

Materialstyrningsmodeller med hänsyn tagen till överdrag och olika efterfrågefördelningar

Stig-Arne Mattsson

Sammanfattning

Materialstyrningsmodeller som används i industrin utgår nästan genomgående från ett antagande om att förbrukningen utgörs av enstycksuttag och ett antagande om att dess variation är normalfördelad. Uttag från lager representerar emellertid i allmänhet alltid kvantiteter som är större än ett styck och det är inte särskilt självklart att efterfrågefördelningar är normalfördelade, speciellt inte vid korta ledtider och stora efterfrågevariationer. Om de båda antagandena inte på ett rimligt sätt är uppfyllda kommer man inte att uppnå den servicenivå som man önskar och som materialstyrningssystemet dimensionerats för.

Syftet med det forskningsprojekt som redovisas i föreliggande rapport har varit att studera hur man kan använda två andra fördelningar, gammafördelning och empirisk efterfrågefördelning samt vilka resultat man i så fall skulle kunna uppnå med avseende på erhållna servicenivåer. Syftet har också varit att utveckla modeller för att kunna ta hänsyn till lageruttag större än ett styck samt att utvärdera modellernas effekter på erhållna servicenivåer. Utvärderingarna har dels baserats på teoretiskt genererade efterfrågedata, dels på efterfrågehistorik som erhållits från fyra fallföretag. Resultat och slutsatser från projektet sammanfattas nedan.

*Genomförda beräkningar visar att överdrag kan ha en betydande storlek i förhållande till beställningspunkternas storlek, speciellt vid korta ledtider och varierande efterfrågan. De visar också att överdrag som erhålls med de utvecklade teoretiska modellerna överensstämmer mycket väl med de **överkliga** värden som erhållits med hjälp av simulering. Materialstyrningsmodeller som tar hänsyn till överdrag ger genomgående en högre erhållen servicenivå än de utan sådana hänsyn. Skillnaderna är signifikanta. Den allmänna slutsats man kan dra baserat på de erhållna resultaten är att det endast är vid efterfrågevariationer karakteriserade av variationskoefficienter mindre än storleksordningen 0,35 under ledtid som man kan tillåta sig att avstå från att ta hänsyn till överdrag om man vill uppnå önskade servicenivåer.*

Av de resultat som erhållits vid simuleringarna framgår också att materialstyrningsmodeller baserade på normalfördelning och utan hänsyn tagen till överdrag endast är rimliga att använda vid mycket jämn efterfrågan, dvs för variationskoefficienter mindre än 0,5. Tas hänsyn till överdrag blir modellen med normalfördelning även användbar för efterfrågefall med variationskoefficienter under ledtid på storleksordningen 1 eller mindre.

Om i stället materialstyrningsmodellen baseras på gammafördelning och kan ta hänsyn till överdrag kommer erhållna servicenivåer att i huvudsak ligga inom en felmarginal på +/- en procentenhet, oavsett hur mycket efterfrågan varierar. En slutsats är följaktligen att gammafördelningsbaserade lagerstyrningsmodeller kan betraktas som jämförelsevis klart bättre än normalfördelningsbaserade vad gäller att uppnå acceptabla felmarginaler för erhållna servicenivåer. Ytterligare mindre felmarginaler erhålls med hjälp av empirisk fördelning och hänsyn tagen till överdrag.

Erhållna resultat visar dessutom att ju ojämnare efterfrågan är, desto mindre varierar servicenivån över tiden om modellerna baseras på gammafördelning eller empirisk fördelning i stället för normalfördelning, i båda fallen med hänsyn tagen till överdrag.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

För att på ett effektivt sätt styra materialflöden i försörjningskedjor utnyttjas modeller av olika slag. Sådana modeller används bland annat vid materialstyrning, exempelvis i beställningspunktssystem som stöd för att fatta beslut om när ett lager måste fyllas på för att man skall undvika brist och med hur stor kvantitet det skall fyllas på. En modell utgör emellertid en förenklad bild av verkligheten. Att förenklingar måste göras beror bland annat på att verkligheten i allmänhet är för komplex för att möjliggöra att alla påverkande och samverkande faktorer skall kunna beaktas. Genom att i en modell förenkla den verklighet man vill studera får man ett mer rationellt och hanterbart verktyg att använda som analys hjälpmedel och beslutsstöd av olika slag. Är det fråga om en operationsanalytisk modell är förenklingar dessutom nödvändiga för att man med matematiska metoder över huvud taget skall kunna behandla en problemställning.

Eftersom man fattar beslut och drar slutsatser från modeller som utgör förenklade bilder av verkligheten i stället för från verkliga förhållanden, är det av avgörande betydelse att modellernas avbildningsförmåga är tillräckligt hög. Det innebär att de faktorer och sambanden mellan dem som modellen beaktar är de som är mest relevanta av alla de som förekommer i den verkliga beslutssituationen. Dessutom måste sambandens utseende och egenskaper på ett acceptabelt sätt överensstämma med verklighetens. Om så inte är fallet kan problemlösningen i bästa fall vara optimal från ett teoretiskt perspektiv, men mer eller mindre oanvändbar och vilseledande från ett praktiskt problemlösningssperspektiv.

Att i företag tillhandahålla modeller med låg avbildningsförmåga leder inte bara till bristande besluts kvalitet. Det leder också till att användare inte får förtroende för dem och inte utnyttjar dem ens för att få vägledning i sitt beslutsfattande. I stället baserar man i brist på bättre hjälpmedel sina beslut på allt från mer eller mindre välgrundade erfarenheter till ett tämligen okvalificerat tyckande. Den mycket ringa användningen av beräkningsmodeller för materialstyrning i svensk industri torde bland annat bero på detta (Jonsson och Mattsson, 2005). Om kvaliteten på beslutsfattandet i svensk industri skall kunna utvecklas räcker det inte med att försöka motivera användare att i större utsträckning använda de beräkningsmodeller som finns. Man måste också förse dem med mer kvalificerade modeller som de i större utsträckning kan känna förtroende för.

Mer kvalificerade modeller krävs också för att kunna öka automatiseringsgraden vid materialstyrning. Med mer kvalificerade modeller möjliggörs att ERP-systemen inte endast står för att tillhandahålla beslutsunderlag för att planera in nya lagerpåfyllnadsorder utan även att i större utsträckning automatiskt frisläppa dem till den egna verkstaden eller externa leverantörer utan inslag av mänskliga arbetsinsatser och kontroller. På så sätt kan mänsklig arbetskraft frigöras och i stället för rutinarbete med de materialflöden som flyter friktionsfritt ägnas åt att åtgärda de flöden som det uppstått eller förväntats uppstå problem i.

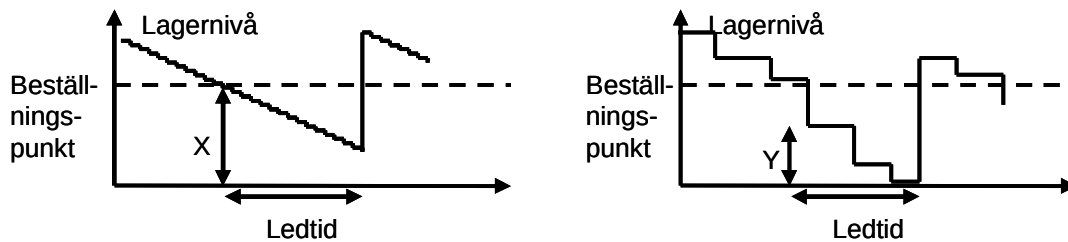
1.2 Problemdiskussion och forskningsfrågor

Merparten av alla de materialstyrningsmodeller som används i industrin bygger på antagandet att efterfrågan under ledtid är normalfördelad och att varje lageruttag avser en styck. Båda dessa antagande är i många sammanhang tveksamma. Detta förhållande påpekades redan av Silver (1970)¹. Silver konstaterar att "Most usable inventory control procedures are based upon assumptions about the demand distributions (e.g. unit sized transactions or normally distributed demand in a replenishment lead time) that are invalid in the case of an erratic item. If this is not the case, the procedures tend to be computationally intractable".

Att uttagskvantiteterna är lika med ett är praktiskt taget aldrig fallet i verkliga lager. Om lageruttagen är större än ett i ett beställningspunktssystem kommer lagret när beställningspunkten underskrids och nya inleveransorder skall planeras in att ligga mer eller mindre under beställningspunkten. Så kallade överdrag uppstår. Den kvantitet som återstår för att täcka efterfrågan under ledtid och som beställningspunkten är dimensionerad för, kommer följaktligen att bli för liten vilket medför att man får fler brister och lägre servicenivåer än vad som avsetts. Om ledtiderna är långa har dessa överdrag förhållandevis liten betydelse. Ju kortare ledtiderna är, desto större betydelse kommer emellertid överdragen att få och desto större kommer skillnaderna mellan önskad och erhållen servicenivå att bli. Vid ledtider under 5 till 10 dagar är skillnaderna i många fall avsevärda.

Vad som händer när lageruttagen är större än ett illustreras i figur 1. De streckade linjerna avser beställningspunkter. I båda fallen, dvs både i figuren till vänster och i figuren till höger, går lagret under beställningspunkten och följaktligen skall en lagerpåfyllnadsorder läggas ut. I fallet till vänster med uttagskvantiteter lika med 1 återstår kvantiteten X för att täcka efterfrågan under tiden fram till nästa inleverans eftersom det uttag som utlöste en ny order endast medfört att beställningspunkten nås. I fallet till höger återstår endast kvantiteten Y för att täcka samma efterfrågan eftersom det uttag som utlöste en ny order medfört att beställningspunkten underskridits. Att bortse från överdrag kan ha en avsevärd påverkan på en materialstyrningsmodells förmåga att ge önskade servicenivåer med minimal kapitalbindning. Detta har bland andra påvisats av Hill (1988) och Janssen m fl (1998).

¹ Citatet är hämtat från Ward (1978).



Figur 1 Beställningspunktssystem med överdrag

Det finns två principiella tillvägagångssätt för att lösa detta problem. Det ena alternativet innebär att man avsiktligt överdimensionerar säkerhetslagret genom att vid dimensioneringen utgå från en högre servicenivå än den man eftersträvar att uppnå. Det andra alternativet innebär att försöka bestämma hur stort överdragets är och hur mycket det varierar för att därigenom vid bestämningen av beställningspunkter eller motsvarande för andra materialstyrningsmetoder kunna ta hänsyn till överdragets storlek och variation. Det senare alternativet kan förväntas vara lämpligare av tre olika skäl. Att utgå från en högre servicenivå än den önskade innebär att man i stor utsträckning måste basera beställningspunktsdimensioneringen på intuition och allmänna bedömningar snarare än på fakta. Att utgå från en högre servicenivå än beräknat innebär inte att alla artiklar får den önskade servicenivån, endast att medelservicenivån för alla artiklar blir lika med den önskade. Vissa artiklar kommer att få en för hög servicenivå, främst de med hög och jämn förbrukning, medan andra får en för låg servicenivå, främst de med ojämn förbrukning. Man får därmed inte full kontroll över vilka servicenivåer man får för enskilda artiklar och därigenom inte över vilka åtagande man kan göra mot sina kunder. Genom att man får en spridning av servicenivåer över artikelsortimentet kommer man också att få en högre kapitalbindning för att uppnå en given medelservicenivå jämfört med vad man skulle få om man genom att ta hänsyn till överdrag kan uppnå denna servicenivå för varje artikel.

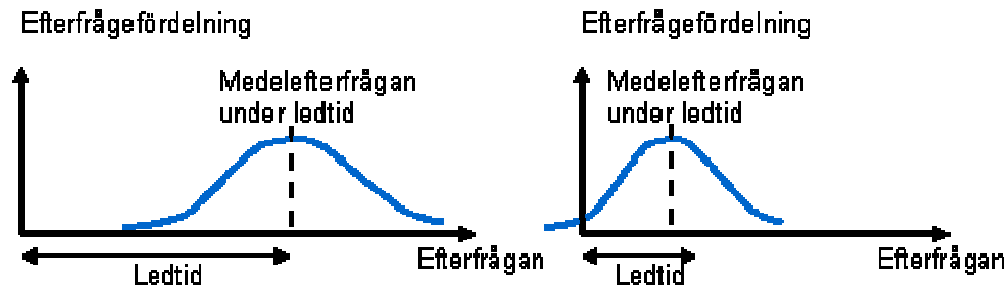
Mot denna bakgrund är det av intresse att besvara följande forskningsfråga.

- Hur kan man beräkna överdragets storlek och variation och hur kan man komplettera traditionellt använda materialstyrningsmodeller så att hänsyn kan tas till de beräknade värdena?

I ERP-system använda materialstyrningsmodeller bygger nästan uteslutande på ett antagande om att efterfrågan är normalfördelad och symmetriskt fördelad i förhållande till sitt medelvärde. Med undantag för artiklar med mycket få uttag per tidsenhet och som därmed har så kallade klumpade behov (lumpy demand) och om ledtiderna är långa är detta antagande inte helt orimligt. Att så är fallet är en konsekvens av centrala gränsvärdessatsen som innebär att när ett antal oberoende slumpmässiga variabler summeras tenderar den summerade variabeln att vara normalfördelad även om de bakomliggande variablerna inte är det (Meek m fl, 1989, sid 199). Ju fler ingående variabler, desto bättre överensstämmelse med normalfördelningen. En lång ledtid innebär att ett större antal dagars slumpmässiga efterfrågan ingår i summa efterfrågan under ledtid än om ledtiden är kort. Följaktligen blir ledtidens efterfrågefördelning mer normalfördelningslik när ledtiden är lång än när den är kort.

Korta ledtider innebär också större sannolikhet för att den vänstra delen av normalfördelningen representerar negativ efterfrågan. Eftersom negativ efterfrågan inte existerar

innebär detta att verkliga efterfrågefördelningar är osymmetriska och skeva åt höger jämfört med normalfördelningen. Verkliga efterfrågefördelningar får därigenom mer inslag av mycket höga efterfrågevärden än av mycket låga efterfrågevärden. Ur materialstyrningssynpunkt är detta detsamma som att bristsannolikheten blir högre och därmed servicenivån lägre för den verkliga efterfrågefördelningen jämfört med vad den skulle blivit om fördelningen varit normalfördelad. Följaktligen får man en lägre servicenivå än man dimensionerat systemet för. Ju längre ledtiderna är desto mindre inslag av negativa efterfrågevärden och desto mindre inslag av skevhet i fördelningen och därmed desto mindre skillnader mellan verklig fördelning och normalfördelning.



Figur 2 Illustration av vad som händer med normalfördelningsfunktionen för efterfrågan under ledtid när ledtiden är lång respektive kort.

Figur 2 illustrerar vad som händer när ledtiden är kort. Den vänstra delen av figuren representerar fallet med långa ledtider. Medelefterfrågan under ledtid är då större än åtskilliga standardavvikelser och sannolikheten för negativ efterfrågan liten. Om i stället ledtiden är kort enligt den högra delen av figuren blir förhållandet annorlunda. Ju kortare ledtid, desto större sannolikhet för negativa efterfrågevärden. Exempelvis blir sannolikheten för negativ efterfrågan 2,5 % om medelefterfrågan under ledtid är lika med 1,96 gånger standardavvikelsen under ledtid. Antalet standardavvikelser mellan noll och medelefterfrågan är kritisk med avseende på hur väl en normalfördelning kan förväntas representera en verklig efterfrågefördelning. Måttet används därför som ett kriterium för när det är rimligt att approximera en efterfrågefördelning med normalfördelningen. Exempelvis hävdar Flagan (1984) att normalfördelningen kan användas om medelefterfrågan är större än 1,7 gånger standardavvikelsen och Schönsleben (2004) att normalfördelningen kan användas om medelefterfrågan är större än 2,5 gånger standardavvikelsen. Ett ännu hårdare krav ställer Razi och Tarn (2003) som menar att normalfördelningen endast bör användas om medelefterfrågan är större än fem standardavvikelser.

Traditionellt har problemet med att dimensionera säkerhetslager baserat på en önskad servicenivå lösts genom att anta att efterfrågevariationerna följer någon form av standardiserad efterfrågefördelning. I tillämpningar i företag har det nästan uteslutande rört sig om att basera beräkningarna på en normalfördelning. Det förekommer emellertid också att Poissonfördelningar används, speciellt för materialstyrning av reservdelslager, och i enstaka fall även ytterligare standardfördelningar.

Att välja lämplig fördelning kan ha stor betydelse. Detta har bland andra illustrerats av DeLurgio och Bahme (1991, sid 592). De har med hjälp av enkla beräkningar påvisat vilka skillnader det kan föreligga om man utgår från ett antagande om att den verkliga efterfrågefördelningen motsvarar en Poissonfördelning eller en normalfördelning. Vid

samma medelvärden och standardavvikelser medförde Poissonfördelningen storleksordningen dubbelt så stora bristkvantiteter per lagercykel som normalfördelningen för lågrörliga artiklar.

I litteraturen finns det dock delade meningar om hur betydelsefullt valet av fördelning är. Utifrån ett mer praktiskt perspektiv argumenterar Wilkinson (1996, sid 239) för att val av efterfrågefördelning har mindre betydelse och att *irrespective of volume and variability it is valid to assume a normal distribution*. Silver och Peterson (1985, sid 289) menar att de fel som begås genom att använda normalfördelning är små i jämförelse med andra inslag av osäkerheter vid dimensionering och användning av beställningspunkter. I motsats till detta hävdar Lau (1989, sid 99) att om man använder en normalfördelning och den verkliga efterfrågefördelningen inte är normal kommer man att få stora skillnader mellan beräknat och optimalt säkerhetslager och stora skillnader i erhållen servicenivå jämfört med önskad. Zotteri (2000, sid 32) menar att betydelsen av att välja rätt efterfrågefördelning är speciellt viktig ju högre servicenivå man vill ha. Skillnaderna i erforderlig lagerstorlek är i sådana fall starkt beroende av vald fördelning. En liknande uppfattning redovisas också av Bookbinder och Lordahl (1989, sid 302).

Den fråga man då ställs inför är vilken fördelning man bör välja i en konkret situation. I litteraturen har ett antal riktlinjer formulerade som underlag för val av fördelning. Se exempelvis Mattsson (2003) för val av normalfördelning och Poissonfördelning. Normalfördelningen är i många avseenden attraktiv att använda. Det finns en utbredd erfarenhet av att använda den och det finns en väl utvecklad beräkningsmetodik för att använda den för att dimensionera säkerhetslager. Normalfördelningen har emellertid en del användarmässiga begränsningar, speciellt vid stora efterfrågevariationer eftersom den är symmetrisk kring sitt medelvärde och inte minst vid korta ledtider då den riskerar att inkludera negativa efterfrågevärden. I båda fallen leder den till för små säkerhetslager och därmed lägre servicenivåer än man dimensionerat sitt materialstyrningssystem för.

Med Poissonfördelning undviker man problemen med negativa efterfrågevärden. Det är också en osymmetrisk fördelning. Den stora svagheten med Poissonfördelningen är emellertid att den utgår från att efterfrågans medelvärde är lika med dess varians. Detta medför att den endast är rimligt tillämpningsbar när varje kundorder representerar mycket små kvantiteter, exempelvis så som förhållandena kan vara i reservdelslager.

Gammalfördelningen är en fördelning som förenklat kan sägas kombinera normalfördelningens och Poissonfördelningens fördelar. Den är emellertid beräkningsmässigt mer ofullständigt utvecklad i litteraturen, speciellt om man vill använda fyllnadsgrad som servicenivådefinition. Att gammalfördelningen kan vara ett intressant alternativ till normalfördelningen påpekas bland annat av Moors och Strijbosch (2002). Den är också enligt litteraturen och enligt egen erfarenhet näst intill helt otestad i praktisk användning i företag. Dess egenskaper bedöms emellertid så intressanta att det kan vara önskvärt att utveckla dess användbarhet och att utvärdera användningen av den. Mot denna bakgrund är det naturligt att formulera följande forskningsfråga.

- Hur kan man använda gammalfördelningen för att dimensionera säkerhetslager och hur mycket betyder det att använda denna fördelning jämfört med att använda normalfördelningen?

Användning av standardfördelningar för att modellera efterfrågevariationer innebär ett antal nackdelar, oavsett vilken fördelning som valts. Det är svårt att veta i vilken utsträckning de på ett rimligt korrekt sätt representerar de verkliga efterfrågevariationerna. Graden av överensstämmelse kan förändras över tiden. Till nackdelarna räknas också att de matematiska och statistiska samband som måste användas vid tillämpning av standardfördelningar ofta är svåra att förstå för personal som arbetar med materialstyrning.

En naturlig fråga att ställa sig i det här sammanhanget är därför Varför över huvud taget arbeta med standardiserade efterfrågefördelningar? Varför inte i stället generera en verklig efterfrågefördelning med utgångspunkt från efterfrågehistorik och använda den för dimensionering av säkerhetslager och beställningspunkter? Man behöver då inte bekymra sig om ifall villkoren för den använda standardfördelningen är uppfyllda eller ej. Däremot innebär förfarandet ett antagande om att det historiska efterfrågemönstret är representativt även för den framtida efterfrågan. I princip måste emellertid samma typ av antagande göras även då man utgår från en standardfördelning som på basis av historiskt material testats och visat sig väl överensstämma med den faktiska efterfrågefördelningen. Resonemanget leder fram till följande forskningsfråga.

- Hur kan man generera empiriska efterfrågefördelningar och hur mycket betyder det att använda dem jämfört med att använda normalfördelningen vid dimensionering av säkerhetslager?

1.3 Syfte och avgränsningar

Om man bortser från förekomst av överdrag och att efterfrågan inte på ett rimligt sätt kan approximeras med en normalfördelning som även innehåller negativa efterfrågevärden kommer erhållen servicenivå att bli lägre än den servicenivå som materialstyrningssystemet dimensioneras för, speciellt vid korta ledtider. Syftet med det forskningsprojekt som redovisas i denna rapport är att utveckla en metodik som kan komplettera vanligt förekommande materialstyrningsmetoder så att hänsyn till överdrag kan tas och så att man inte blir beroende av att den verkliga efterfrågan måste vara normalfördelad. Syftet är också att testa och utvärdera i vilken utsträckning den utvecklade metodiken kan bidra till att åstadkomma en större överensstämmelse mellan dimensionerande och erhållen servicenivå.

Projektets inriktning har primärt varit att studera modeller som går att tillämpa praktiskt i industrin och som kan förväntas ge tillfredsställande resultat. Det är inte fråga om att söka någon form av teoretiskt optimala lösningar. Eftersom den information om efterfrågan och efterfrågevariationer som finns tillgänglig i affärssystem i huvudsak är begränsad till transaktionshistorik, medelvärden och standardavvikelser har endast metoder som bygger på tillgång till dessa datauppgifter inkluderats i studien. Studien avser fallet att efterfrågan inte går förlorad när bristsituationer uppstår.

Det forskningsprojekt som redovisas i denna rapport syftar till att studera hur gammafördelningar och empiriska efterfrågefördelningar kan genereras med hjälp av efterfrågehistorik. Syftet är också att utvärdera de båda fördelningarna vid materialstyrning i förhållande till de resultat i form av erhållna servicenivåer som man får genom att använda normalfördelning.

Dimensionering av beställningspunkter och säkerhetslager påverkas inte endast av variationer i efterfrågan utan även av variationer i ledtider för lagerpåfyllning. Detta inslag av osäkerhet behandlas emellertid inte här. Ledtiden antas vara konstant och känd. Vidare behandlas endast fall där efterfrågan varierar slumpmässigt utan förekomst av trender eller säsongvariationer.

Vid analyser och utvärderingar av vilka servicenivåer som kan erhållas med hjälp av empirisk fördelning och gammafördelning i förhållande till normalfördelning har endast beställningspunktssystem använts för den simulerade materialstyrningen. Denna avgränsning bedöms emellertid inte innebära några begränsningar för studiens slutsatser eftersom materialstyrningssystem som periodbeställningssystem, täcktidsplanering och materialbehovsplanering alla bygger på samma grundprinciper för beräkning av när ett lager måste fyllas på.

1.4 Rapportens uppläggning

Föreliggande rapport redovisar utgångspunkter, tillvägagångssätt, analyser och slutsatser från det genomförda forskningsprojektet. Redovisningen är upplagd enligt följande.

I kapitel 2 redovisas det dataunderlag och det angreppssätt som använts för att genomföra beräkningar, analyser och jämförelser av att ta hänsyn till överdrag och av att använda olika fördelningar för bestämning av beställningspunkter. Bland annat presenteras den teoretiskt genererade efterfrågan och den efterfrågehistorik som erhållits från fyra fallföretag och som utgjort underlag för simuleringar och analyser. Dessutom presenteras använd simuleringsmodell.

Olika i litteraturen förekommande modeller för bestämning av överdrag och dess variationer presenteras i kapitel 3. I kapitlet behandlas också val av modeller inklusive vissa anpassningar för att göra valda modeller praktiskt användbara.

I industrin används ett antal olika materialstyrningsmodeller. Dessa modeller måste på olika sätt kompletteras för att hänsyn skall kunna tas till överdrag. I kapitel 4 redovisas sådan kompletteringar, både med avseende på medelöverdragets storlek och på dess variation.

De modeller för att beräkna överdrags medelstorlek och variation som valts och som redovisats i kapitel 3 är approximationer. För att få en uppfattning av om dessa approximationer ger acceptabelt tillfredsställande värden har överdragsmodellerna testats och utvärderats genom att jämföra teoretiskt beräknade värden med simulerade överkliga värden. Resultaten från dessa beräkningar och utvärderingar redovisas i kapitel 5.

Val av fördelning spelar en avgörande roll för i vilken utsträckning en materialstyrningsmodell kan åstadkomma servicenivåer som motsvarar de önskade och de som materialstyrningssystemet dimensionerats för. I den här studien har normalfördelning, gammafördelning och empirisk fördelning behandlats. I kapitel 6 presenteras dessa fördelningar och något om deras egenskaper. Dessutom redovisas hur man kan använda dem när servicenivån definieras som fyllnadsgrad.

Med hjälp av de olika fördelningarna och genom att ta hänsyn till överdrag och dess variation har beställningspunkter beräknats för såväl den teoretiskt genererade efterfrå-

gan vid ett antal olika långa ledtider som för den efterfrågehistorik som erhållits från fallföretagen. Resultat från dessa beräkningar redovisas i kapitel 7. En analys och jämförelse mellan de med olika modeller beräknade beställningspunkterna görs också. Dessutom redovisas en metodik för utjämning vid beräkning av beställningspunkter så att dess variationer övertiden kan begränsas. Jämförelser mellan utjämnade och icke utjämnade beställningspunkter görs också.

Med utgångspunkt från de beställningspunkter som beräknats med hjälp av olika materialstyrningsmodeller, baserade på olika efterfrågefördelningar samt med eller utan hänsyn till överdrag har analyser av vilka servicenivåer som kan uppnås genomförts med hjälp av simulering. Simuleringarna har också inkluderat analyser av hur mycket erhållna servicenivåer varierar över tiden samt vilka effekter man får på servicenivåerna storlek och variation av att tillämpa utjämning vid beställningspunktsberäkning. Dessa analyser och jämförelser mellan olika lagerstyrningsmodeller presenteras i kapitel 8.

I kapitel 9 görs en sammanfattning av de i projektet erhållna resultaten. Dessutom dras ett antal slutsatser med utgångspunkt från dessa resultat.

2 Analysmetodik och dataunderlag

För att besvara de två forskningsfrågorna och kunna utvärdera användning av gammafördelning respektive empirisk fördelning i förhållande till normalfördelning har simulering med hjälp av Excel och makroprogram skrivna i Visual Basic använts. Simulering är en förhållandevis ofta använd metod för att utvärdera materialstyrningssystem och materialstyrningspolicys (se exempelvis Olhager och Persson, 2006, Huq et al, 2006, Banerjee et al, 2003, Ganeshan et al, 2001, Hong-Minh et al, 2000, Småros et al, 2003). Som underlag för de genomförda simuleringarna har dels teoretiskt genererade efterfrågedata, dels efterfrågehistorik från fyra fallföretag använts. I detta kapitel presenteras detta efterfrågeunderlag och den simulerings- och utvärderingsmetodik som utnyttjats för att besvara forskningsfrågorna.

2.1 Dataunderlag

För att genomföra de analyser och utvärderingar som krävs för att besvara de tre forskningsfrågorna har två typer av dataunderlag använts, ett teoretiskt genererat och ett från fyra olika fallföretag. I båda fallen omfattar dataunderlaget främst data i form av efterfrågan, orderstorlekar och ledtider. Syftet med att använda teoretiskt genererad data är att man kan uppnå större kontroll över datamaterialets karaktär och därigenom lättare och säkrare kunna identifiera samband och dra slutsatser än om datamaterial från fallföretag används. Syftet med faktiska data från fallföretag är i stället, dels att kunna illustrera, dels verifiera de resultat som uppnåtts från det teoretiskt genererade datamaterialet.

Den teoretiskt genererade efterfrågan har skapats genom att kombinera slumpmässigt bestämda orderkvantiteter med slumpmässigt bestämda antal kundorder per dag för att den skall bli så verklighetsnära som möjligt. Poissonfördelning har valts för att generera antal kundorder per dag och rektangelfördelning för att bestämma kundorderstorlekar. Empiriska bevis för att kundorder i huvudsak erhålls slumpmässigt och därmed är en Poissonprocess har påvisats av Johnston och Boylan (1996). Nio olika efterfrågestruktur-

rer har skapats, en med i medeltal 10 kundorder per dag och kundorderkvantiteter på mellan 1 och 10 styck, en med i medeltal 3 kundorder per dag och kundorderkvantiteter på mellan 1 och 10 styck, en med i medeltal 1 kundorder per 2 dagar och kundorderkvantiteter på mellan 1 och 10 styck, en med i medeltal 1 kundorder per 2 veckor och kundorderkvantiteter på mellan 1 och 10 stycken, med i medeltal 1 kundorder per 2 månader i medeltal, en med i medeltal 1 kundorder per 2 dagar och kundorderkvantiteter på mellan 50 och 200 styck, en med i medeltal 1 kundorder per 2 månader och kundorderkvantiteter på mellan 50 och 200 styck, en med i medeltal 1 kundorder per 2 dagar och kundorderkvantiteter på mellan 1 och 3 styck samt en med i medeltal 1 kundorder per 2 månader och kundorderkvantiteter på mellan 1 och 3 styck. Detta medför att medelefterfrågan per månad (i den här studien betraktad som 20 dagar lång) för de nio efterfrågestrukturerna blir 1.100 styck, 330 styck, 55 styck, 11 styck, 3 styck, 1.250 styck, 63 styck, 20 styck respektive 1 styck.

De fem första efterfrågestrukturerna avses representera ett antal generiska förhållanden för materialstyrning. Efterfrågestruktur 6 och 7 avses representera förhållanden som är typiska för centrallager/grossistlager med jämförelsevis få uttag och stora kundorderkvantiteter medan efterfrågestruktur 8 och 9 representerar förhållanden som är typiska i reservdelslager med få uttag och små kundorderkvantiteter. För varje efterfrågestruktur har 6000 dagars efterfrågan motsvarande 25 år genererats för vardera tjugo artiklar. Genereringen har genomförts med hjälp av Excel.

För att verifiera att den genererade efterfrågan är slumpmässig har den testats med avseende på förekomst av autokorrelation. Autokorrelation definieras av Hanke och Reitsch (1989, sid 144) som *the extent to which a time series variable, lagged one or more periods, is correlated with itself*. En korrelationskoefficient i närheten av 0 innebär att det inte finns något samband mellan efterfrågan i en period och efterfrågan i följande period och därmed att efterfrågan varierar slumpmässigt från period till period. Förekomst av korrelation har testats med avseende på samband mellan efterfrågan i på varandra följande månader. I inget fall blev korrelationskoefficienten större än 0,01.

Fem olika ledtider för återanskaffning, 2, 5, 10, 20 och 40 dagar långa, har använts. Kvantiteterna på inleveransorder har genomgående satts till 20 dagars medelefterfrågan. Variationskoefficienter för de olika efterfrågestrukturerna och ledtiderna visas i tabell 1. Som framgår av tabellen täcker den teoretiskt genererade efterfrågan ett brett spektrum av efterfrågeförhållanden med avseende på variationskoefficienter.

Tabell 1 Efterfrågekaraktär för de olika testade efterfrågescenarierna

Efterfrågestruktur	Antal order och orderstorlek	Ledtid				
		2 dagar	5 dagar	10 dagar	20 dagar	40 dagar
1	10 order/dag 1 i 10 st/order	0,25	0,16	0,11	0,08	0,06
2	3 order/dag 1 i st/order	0,46	0,29	0,21	0,15	0,10
3	1 order/2 dagar 1 i 10 st/order	1,13	0,72	0,51	0,36	0,25
4	1 order/2 veckor 1 i 10 st/order	2,53	1,60	1,13	0,80	0,57
5	1 order/2 mån. 1 i 10 st/order	5,19	3,28	2,32	1,64	1,16
6	1 order/2 dagar 50-200 st/order	1,06	0,67	0,48	0,34	0,24
7	1 order/2 mån. 50-200 st/order	4,85	3,07	2,17	1,53	1,09
8	1 order/2 dagar 1-3 st/order	1,09	0,69	0,49	0,34	0,24
9	1 order/2 mån. 1-3 st/order	4,96	3,14	2,22	1,57	1,11

Efterfrågehistorik har erhållits från ett lager i tre olika företag och från två lager i ett företag. Samtliga fallföretag är stora internationellt verksamma verkstadsföretag. Antalet artiklar som analyserats har varit 250 stycken för fyra av lagren och 205 från det femte. De fyra företagens lager kan kort beskrivas enligt följande.

Företag A:s lager är ett reservdelslager. Utöver unika reservdelar lagerförs också reservdelskit. Totalt finns det storleksordningen 10.000 artiklar i lagret, egentillverkade såväl som inköpta från utomstående leverantörer. Lagret försörjer dels slutkunder på den Europeiska marknaden och dels ett regionalt lager i Sydostasien och ett i Nordamerika.

Lagret hos företag B innehåller enbart färdigvaror, varav 90 % är egentillverkade. Sammanlagt lagerhålls storleksordningen 700 artiklar. Lagret är ett centrallager som försörjer 15 lokala lager med drygt 200 av artiklarna. Det försörjer även slutkunder i Norden samt distributörer i Östeuropa och Afrika med dessa 200 artiklar samt dessutom övriga 500.

Tabell 2 Uppdelning av artiklar från de fyra fallföretagen i rörlighetsklasser

<i>Företag</i>	<i>Rörlighetsklass</i>	<i>Intervall</i>	<i>Antal artiklar</i>
A	1	> 250	64
	2	100 i 250	64
	3	40 i 100	60
	4	< 40	62
B	1	> 250	67
	2	100 i 250	65
	3	40 i 100	60
	4	< 40	58
C1	1	> 60	50
	2	30 i 60	31
	3	10 i 30	57
	4	< 10	67
C2	1	> 150	28
	2	50 i 150	85
	3	20 i 50	70
	4	< 20	67
D	1	> 250	56
	2	100 i 250	55
	3	40 i 100	46
	4	< 40	93

Från företag C har två olika lager ingått i studien. Båda avser färdigprodukter av vilka cirka 85 % är egentillverkade. I lager C1 finns storleksordningen 2.500 artiklar och i lager C2 storleksordningen 1.500 artiklar. Lager C1 försörjer både andra lokala lager i Europa och en lokal marknad medan lager C2 endast försörjer kunder på en lokal marknad.

Företag D:s lager utgör ett virtuellt lager bestående av summan av lagertillgångar i tre regionala lager, ett i Europa, ett i Sydostasien och ett i Nordamerika. De lagerpåfyllnadsorder som skapas vid materialstyrningen baseras på den sammanlagda efterfrågan på samtliga marknader. Vid leverans från produktionen fördelas tillverkade kvantiteter till de olika regionala lagren i proportion till den aktuella behovssituationen. Det lagerförda sortimentet är slutprodukter och består av över 20.000 egentillverkade artiklar.

För att karakterisera materialstyrningssituationen för de fem lagren från de fyra fallföretagen har företagens respektive artiklar klassificerats i tre olika dimensioner. En klassificering avser hur många kundorderrader som levereras per period. Alternativt kan man tala om antal plock per dag och en uppdelning av artiklarna i rörlighetsklasser. För varje företag och lager har en uppdelning i fyra olika rörlighetsklasser gjorts. Uppdelningen är individuell för varje lager och har gjorts så att artiklarna blir rimligt jämt fördelade mellan klasserna. Denna uppdelning i rörlighetsklasser och antal artiklar tillhörande varje rörlighetsklass redovisas i tabell 2. I tabellen avser intervall det antal leveranser per år inom vilket en viss artikel skall levereras för att tillhöra rörlighetsklassen.

Tabell 3 Uppdelning av artiklar från de fyra fallföretagen i ledtidsklasser

<i>Företag</i>	<i>Ledtidsklass</i>	<i>Antal artiklar</i>
A	1	0
	2	16
	3	62
	4	172
B	1	43
	2	185
	3	22
	4	0
C1	1	120
	2	69
	3	15
	4	1
C2	1	250
	2	0
	3	0
	4	0
D	1	0
	2	5
	3	14
	4	231

En andra klassificering avser uppdelning av artiklar i ledtider för återanskaffning. Uppdelningen i ledtidsklasser är gemensam för samtliga företag och lager. De olika ledtidsklasserna och antalet artiklar tillhörande varje ledtidsklass visas i tabell 3. Ledtidsklasserna definieras på följande sätt; klass 1 för ledtider mindre än 5 dagar, klass 2 för ledtider mellan 5 och 10 dagar, klass 3 för ledtider mellan 10 och 20 dagar samt klass 4 för ledtider större än 20 dagar. Som framgår av tabellen har företagen A och D förhållandevis längre ledtider än de övriga.

Ett ytterligare sätt att klassificera artiklarna i fallföretagen avser storleken på inleveransorder för att fylla på lagret. För att få en jämförbarhet mellan olika artiklar och företag har kvantiteter på inleveransorder uttryckts i antal dagar vid medelefterfrågan som en inleverans täcker, dvs som en täcktid. De olika inleveransklasserna och antalet artiklar tillhörande varje klass redovisas i tabell 4. De definieras på följande sätt; klass 1 för mer än 12 inleveranser per år, klass 2 för mellan 6 och 12 inleveranser per år, klass 3 för mellan 2 och 6 inleveranser per år samt klass 4 för mindre än 2 inleveranser per år.

Tabell 4 Uppdelning av artiklar från de fyra fallföretagen i inleveransklasser

<i>Företag</i>	<i>Inleveransklass</i>	<i>Antal artiklar</i>
A	1	21
	2	89
	3	138
	4	2
B	1	75
	2	555
	3	92
	4	28
C1	1	35
	2	57
	3	109
	4	4
C2	1	132
	2	67
	3	51
	4	0
D	1	1
	2	8
	3	103
	4	138

I kapitel 1 redovisades några olika i litteraturen publicerade kriterier för att bedöma om en efterfrågefördelning kan betraktas som normalfördelad eller Poissonfördelad. Efterfrågehistoriken från fallföretagen har testats med avseende på dessa kriterier. För att betraktas som normalfördelning har kriteriet medelvärdet > 2 standardavvikelser valts. Motsvarande kriterium för Poissonfördelning har valts så att efterfrågans medelvärde och standardavvikelse högst får skilja sig med 10 % av efterfrågans medelvärde. Baserat på normalfördelningskriteriet framgår andelen artiklar per rörlighetsklass och totalt som uppfyller normalfördelningskriteriet av tabell 5. I tre av företagen är det en försumbar andel artiklar som uppfyller normalfördelningskriteriet medan det är storleksordningen 50 % för de övriga två. En huvudsak till detta kan vara att ledtiderna i de företag för vilka en stor andel artiklar uppfyller normalfördelningskriteriet är klart längre än ledtiderna för artiklarna i de företag som har en liten andel normalfördelningsartiklar.

Tabell 5 Andel artiklar per rörlighetsklass och totalt som uppfyller kriterium för att vara normalfördelade

<i>Rörlighetsklass</i>	<i>Företag A</i>	<i>Företag B</i>	<i>Företag C1</i>	<i>Företag C2</i>	<i>Företag D</i>
1	100 %	30 %	8 %	36 %	100 %
2	70 %	5 %	0 %	0 %	89 %
3	15 %	0 %	0 %	0 %	35 %
4	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %
Totalt	47 %	9 %	2 %	4 %	49 %

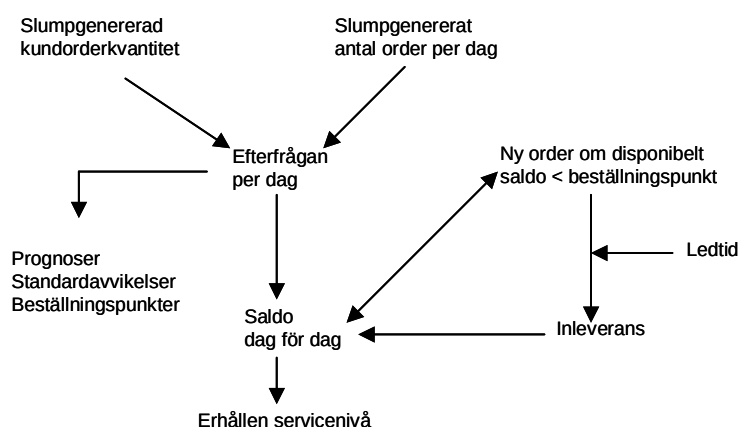
Motsvarande andel artiklar som uppfyller Poissonfördelningskriteriet redovisas i tabell 6. Det är uppenbarligen ännu färre artiklar som uppfyller kriteriet att vara Poissonfördelade.

Tabell 6 Andel artiklar per rörlighetsklass och totalt som uppfyller kriterium för att vara Poissonfördelade

Rörlighetsklass	Företag A	Företag B	Företag C1	Företag C2	Företag D
1	0 %	0 %	2 %	0 %	0 %
2	0 %	0 %	0 %	6 %	0 %
3	0 %	2 %	0 %	7 %	0 %
4	15 %	9 %	1 %	6 %	13 %
Totalt	4 %	2 %	1 %	6 %	5 %

2.2 Simulerings- och utvärderingsmetodik

En översiktlig illustration av den simuleringsmodell som använts för att analysera, jämföra och utvärdera användning av gammafördelad och empirisk fördelad efterfrågan i förhållande till normalfördelad efterfrågan visas i figur 3.



Figur 3 Översikt över den använda simuleringsmodellen

I modellen simuleras dagliga uttag, kontroll av beställningspunkter, utläggning av nya lagerpåfyllnadsorder, inleveranser samt uppdateringar av saldo och disponibelt saldo. Konsekvenser av typ bristkvantiteter och erhållna servicenivåer beräknas månadsvis.

Som materialstyrningsmodell vid simuleringskörningarna har ett beställningspunktssystem av typ periodinspekterat (s,S)-system använts (Silver i Pyke i Peterson, 1998, sid 238). Nya beställningspunkter beräknas vid varje månadsskifte. Förbrukningen under ledtid prognostiseras med hjälp av glidande medelvärde-metoden med tolv månadsvärden och den standardavvikelse som ligger till grund för säkerhetslagerberäkning beräknas med utgångspunkt från efterfrågan per dag ett år tillbaka i tiden. Beräkningarna baseras på användning av fyllnadsgrad som servicenivåbegrepp, dvs servicenivån definie-

ras som andelen av efterfrågan som kan tillfredsställas direkt från lager. Uppkomna brister antas restnoteras för senare leverans.

Att (s,S)-system valts i stället för (s,Q)-system har gjorts för att kunna hantera de mest lågomsatta och lågrörliga efterfrågestrukturerna. Om fast orderstorlek skulle valts med den låga medelefterfrågan det är fråga om för dessa strukturer samtidigt som enstaka kundorder kan avse stora kvantiteter skulle åtskilliga inleveransorder i tät följd behöva ha genererats för att täcka behov från redan inkomna order. För efterfrågestrukturer med små efterfrågevariationer blir skillnaden mellan de båda typerna av system försumbar. S har beräknats som beställningspunkten plus den inleveranskvantitet som valts för de teoretiskt genererade efterfrågefallen och respektive den orderkvantitet som fallföretagen använt för respektive artikel.

För att jämföra alternativa beräkningssätt och parametersättningar för den teoretiskt genererade efterfrågan har parvisa jämförelser tillämpats. Eftersom antalet observationer vid dessa jämförelser i de flesta fall varit tämligen begränsat, oftast av storleksordningen 20 stycken, har t-fördelningen använts för att signifikantesta skillnader.

3 Modeller för överdragsberäkning

I det klassiska beställningspunktssystemet antas lagersaldot kontrolleras kontinuerligt mot beställningspunkten. Det innebär att varje lageruttagstransaktion kan medföra att beställningspunkten nås eller underskrids och att en lagerpåfyllnadsorder läggs ut. Överdraget kommer då att variera mellan noll och den störst förekommande uttags-transaktionen minus ett.

Några modeller för att beräkna sådana överdrags medelvärden och standardavvikelser finns publicerade i litteraturen. Se exempelvis Heyman och Sobel (1982), Matheus och Gelder (2000) samt Baganha et al (1996). För att kunna ta hänsyn till överdrag utan att göra materialstyrningsmodellerna mer komplexa än nödvändigt och för att kunna utgå från data som finns tillgängliga i traditionella ERP-system har en approximativ modell använts. Modellen har bland annat redovisats av Silver, Pyke och Peterson (1998). Enligt modellen kan överdragets medelvärde och standardavvikelse beräknas med hjälp av följande uttryck.

$$\mu_{\text{överdrag}} = \frac{\sigma^2 + \mu^2}{2\mu} - \frac{1}{2} \quad \text{é (1)}$$

$$\sigma_{\text{överdrag}} = \sqrt{\frac{\mu^2 + 3\sigma^2}{3} - \left[\frac{\mu^2 + \sigma^2}{2\mu} \right]^2} - \frac{1}{2} \quad \text{é (2)}$$

där ϵ = medeluttagskvantiteten
 σ = uttagskvantiteternas standardavvikelse

Tijms och Groenevelt (1984) hävdar att dessa approximationer är fullt tillfredsställande förutsatt att variationskoefficienten inte är extremt låg, dvs efterfrågan är mycket jämn.

Hill (1988) har kommit fram till liknande slutsatser efter analytiska beräkningar och jämförelser med optimalt beräknade värden.

I verkligheten förekommer aldrig kontinuerlig jämförelse av saldon och beställningspunkter. Praktiskt sett åstadkoms dock samma sak i så kallade transaktionsorienterade system där beställningspunkten jämförs med lagerlagersaldot efter varje saldpåverkan- de transaktion. Det är emellertid få företag som använder den här typen av system, endast storleksordningen 16 % enligt en enkätundersökning i svenska företag (Jonsson och Mattsson, 2005). Merparten av alla företag använder i realiteten periodiskt beställningspunktssystem även kallat periodinspektionssystem, dvs man inspekterar och jämför saldot med beställningspunkten med en viss periodicitet, exempelvis dagligen. Även om man använder transaktionsorienterade system lägger man sällan ut lagerpåfyllnadsorder direkt när beställningspunkten underskrids utan samlar upp erhållna orderförslag från systemet för att storleksordningen en gång per dag lägga ut inköpsorder till leverantör eller tillverkningsorder till den egna produktionen. Karaktär av periodiskt beställningspunktssystem uppstår också eftersom man sällan använder leveranstidpunkter med högre precision än dag.

Om man har ett periodiskt beställningspunktssystem eller man i praktiken endast lägger ut nya order periodiskt även om man använder ett transaktionsorienterat system måste man vid beräkningen av överdrag också ta hänsyn till att flera kundorder kan ha erhållits under inspektionsintervallet. Hill (1988) har härlett nedanstående uttryck för hur stora kvantiteter man skall lägga till på överdragets medelvärde och standardavvikelse under förutsättning att sannolikheten att beställningspunkten skall underskridas är lika stor oavsett var i inspektionsintervallet man befinner sig när en ny lagertransaktion uppstår. Vid korta inspektionsintervall är detta ett rimligt antagande.

$$\mu_{inspektion} = \frac{\mu * I}{2}$$

$$\sigma_{inspektion} = \sqrt{\frac{\sigma^2 * I}{2} + \frac{(\mu * I)^2}{12}}$$

där I = inspektionsintervallets längd

Nackdelen med att behöva göra dessa i och för sig enkla beräkningar för att beräkna överdragets medelvärde och standardavvikelse är att data om hur stora kundorderna i medeltal har varit och vilken standardavvikelse de haft i allmänhet inte finns tillgängliga som standard i de affärssystem som finns på marknaden.

Enligt den ovan nämnda enkätstudien är inspektions- och beställningsintervall på en dag det klart vanligaste alternativet i svensk industri. Med ett så kort intervall kommer det inte att ha någon nämnvärd betydelse om en kundorder erhålls i början eller slutet av intervallet. Det är därför enligt Lewis (1975, sid 128) rimligt att anta att summa förbrukad kvantitet under ett inspektionsintervall med avseende på överdrag kan betraktas som ett makrouttag. Formel 1 ovan kan då användas för att beräkna överdragets medelvärde för fall med korta inspektionsintervall om μ sätts lika med i medeltal förbrukad kvantitet under inspektionsintervallet och σ lika med standardavvikelsen för förbrukningsvariationerna i inspektionsintervallen. Uppgifter om medelförbrukning och stan-

metods förmåga att åstadkomma önskade servicenivåer med så låg kapitalbindning i lager som möjligt. Effekter av överdrag och hur hänsyn kan tas till dess förekomst med hjälp av de valda modellerna enligt föregående kapitel behandlas här för följande materialstyrningsmetoder.

- Beställningspunktssystem med saldoberoende orderkvantiteter i (s,Q)-system
- Beställningspunktssystem med saldoberoende orderkvantiteter i (s,S)-system
- Periodbeställningssystem i (R,S)-system
- Täckidsplanering
- Materialbehovsplanering

4.1 Överdrag i (s,Q)-system

Med ett (s,Q)-system² menas det traditionella beställningspunktssystemet för vilket aktuellt lagersaldo³ kontinuerligt jämförs med beställningspunkten s. Om saldot underskrider s sker en beställning med orderkvantiteten Q. I praktisk tillämpning förekommer inte kontinuerliga jämförelser. I stället är det fråga om att göra jämförelsen vid varje lagersaldopåverkande transaktion. Det är emellertid än vanligare att jämförelser endast görs med vissa intervall, exempelvis dagligen eller varje vecka. Det är då fråga om ett så kallat periodiskt beställningspunktssystem eller periodinspektionssystem. Vid beräkning av beställningspunkter måste man då göra en justering så att hänsyn tas till inspektionsintervallets längd. Justeringen görs baserat på antagandet att det i genomsnitt har gått ett halvt inspektionsintervall mellan tidpunkterna för uttagstransaktionerna och nästa beställningspunktsjämförelse. Görs dagliga jämförelser, vilket det genomgående är fråga om i den här studien, är det alltså fråga om att lägga till en halv dag på ledtiden vid beräkning av säkerhetslager och beställningspunkter.

Om hänsyn tas till överdrag enligt föregående kapitel betraktas samtliga uttag under en dag som ett makrouttag och (s,Q)-systemet med hänsyn till överdrag kan därför betraktas som ett transaktionsorienterat beställningspunktssystem, dvs något tillägg för uttag under inspektionsintervallet behöver inte göras. Däremot måste hänsyn tas till överdragets variationer vid beräkningen av standardavvikelser för säkerhetslagerberäkning. Enligt föregående kapitel approximeras överdragets standardavvikelse med efterfrågans standardavvikelse per dag. Antar man då att efterfrågan under ledtid och överdraget är oberoende stokastiska variabler kan den kombinerade standardavvikelsen för de båda variablerna beräknas med hjälp av följande uttryck.

$$\sigma_{\text{kombinerad}} = \sqrt{\sigma(\text{dag})^2 * lt + \sigma(\text{dag})^2 * 1} = \sigma(\text{dag}) * \sqrt{lt + 1}$$

é é é é é é é .é é é é é é ..é é (4)

där $\sigma(\text{dag})$ = efterfrågans standardavvikelse per dag
 lt = ledtiden i dagar

² Det beteckningssätt för olika materialstyrningsmetoder som tillämpas av Silver-Pyke-Peterson (1998) har genomgående använts i den här rapporten.

³ Det som skall jämföras med beställningspunkten är egentligen den så kallade lagerpositionen, dvs summan av aktuellt lagersaldo och förväntade inleveranser och minskat med restorder. För att göra framställningen enklare används emellertid genomgående begreppet lagersaldo i den här rapporten.

För att beräkna beställningspunkter för periodiska (s,Q)-system med hänsyn till överdrag kan följaktligen följande formel användas under förutsättning av efterfrågan antas vara normalfördelad.

$$B_{pt} = d * l_t + \mu_{\text{overdrag}} + k * \sigma(dag) * \sqrt{l_t + 1} \quad (5)$$

där B_{pt} = beställningspunkten
 d = efterfrågan per dag
 lt = ledtiden i dagar
 $\mu_{\text{överdrag}}$ = överdragets medelvärde
 k = säkerhetsfaktorn
 $\hat{u}(dag)$ = efterfrågans standardavvikelse per dag

4.2 Överdrag i (R,S)-system

Medan ett (s,Q)-system karakteriseras av att lagersaldon mer eller mindre kontinuerligt jämförs med beställningspunkter och beställning görs om en artikels lagersaldo understiger dess beställningspunkt sker beställning i (R,S)-system periodiskt oavsett lagersaldots storlek vid beställningstillfället. Ett (R,S)-system är sålunda det samma som det som ofta kallas ett periodbeställningssystem. Intervallet mellan beställningar är R dagar och beställningskvantiteten motsvarar skillnaden mellan en så kallad återfyllnadsnivå, S, och aktuellt lagersaldo vid beställningstillfället.

Eftersom orderinitiering inte sker genom jämförelse med aktuellt saldo utan periodiskt medför antagandet om att alla uttagskvantiteter är en styck inte några problem. Följaktligen finns det inte några behov av att göra några överdragsjusteringar med avseende på när beställning skall ske. Detta har också konstaterats av Silver, Pyke och Peterson (1998, sid 278).

4.3 Överdrag i (s,S)-system

Ett (s,S)-system kan karakteriseras på samma sätt som det traditionella beställningspunktssystemet av att aktuellt lagersaldo kontinuerligt jämförs med beställningspunkten s och att varje uttag är en styck. Om lagersaldot underskrider beställningspunkten görs en beställning. Skillnaden består i att beställningen avser en saldoberoende kvantitet Q i (s,Q)-systemet medan den avser en saldoberoende kvantitet som är lika med skillnaden mellan en återfyllnadsnivå S och aktuellt lagersaldo i (s,S)-system. Om uttagskvantiteterna är lika med 1 finns det ingen skillnad mellan de båda systemen.

Inte heller för (s,S)-system förekommer kontinuerliga jämförelser mellan lagersaldo och beställningspunkt i praktiken. Närmast kommer man även i det här fallet om man använder transaktionsorienterade materialstyrningssystem. I sådana system görs jämförelsen vid varje saldpåverkande transaktion. Överdraget blir då på samma sätt som för (s,Q)-system som lägst 0 och som högst den maximalt förekommande uttagskvantiteten minus ett. Genom att man i allmänhet samlar upp erhållna orderförslag för att storleksordningen en gång per dag lägga ut beställningar till leverantör och tillverkningsorder till den egna produktionen får även (s,S)-system karaktär av periodiskt beställningspunktssystem med inspektionsintervall lika med en dag. För (s,S)-system i praktisk användning blir därför överdraget som lägst noll och som högst det maximalt förekommande dags-

uttaget minus ett. Förhållandena med avseende på överdrag är sålunda desamma för (s,Q)-system och (s,S)-system med avseende på beställningspunkten s. Korrigeringsmodellen för överdrag för (s, Q)-system enligt ovan kan därför även användas i det här fallet.

För att uppnå teoretiskt optimala värden måste egentligen variablerna s och S bestämmas samtidigt. Svårigheterna att åstadkomma detta har medfört att ett förenklat tillvägagångssätt som för praktiskt bruk ger fullt tillfredsställande resultat brukar användas. Det innebär att s och Q bestäms på samma sätt som i (s,Q)-system och att S sätts lika med s + Q (Hax i Candea, 1984, sid 223). Använder man periodisk inspektion måste man också ta hänsyn till förbrukningen under inspektionsintervallet och följande formel kan då användas (Magee i Boodman, 1967, sid 137).

$$S = Q + s - \frac{d * R}{2}$$

där d = efterfrågan per dag
 R = inspektionsintervallet i dagar

Den sista termen i formeln ovan kan betraktas som en korrektion för att uttagskvantiteten inte är lika med ett. Ett alternativt sätt vore att i stället minska återfyllnadsnivån S med överdragets medelstorlek. Detta tillvägagångssätt har emellertid inte analyserats och testats i den här studien.

Om efterfrågan vore jämt fördelad kring sitt medelvärde skulle man kunna förvänta sig att korrigeringen för efterfrågan under inspektionsintervallet medför att orderstorleken i medeltal blir lika med ekonomisk orderkvantitet enligt Wilsons formel eller motsvarande. Eftersom emellertid överskottsfördelningar tenderar att vara snedfördelade mot högre värden är det troligt att medelorderstorleken kommer att vara något större än motsvarande ekonomiskt optimala.

4.4 Överdrag vid täcktidsplanering

Täckidsplanering innebär att nya beställningar läggs ut när den så kallade täcktiden är mindre än ledtiden för återanskaffning plus en säkerhetstid. Med täcktid menas den tid som aktuellt lagersaldo räcker. I de flesta sammanhang beräknas denna täcktid genom att dividera lagersaldot med efterfrågan per dag. Beräkningsregeln blir då följande.

Beställ om

$$\text{Täcktiden} \leq \frac{\text{Lagersaldot}}{d} + \text{Säkerhetstiden}$$

där d = efterfrågan per dag

Om man multiplicerar ekvationens båda sidor med efterfrågan per dag ser man att denna beställningsregel är identisk med motsvarande i ett beställningspunktssystem. Följaktligen kan överdrag behandlas på i princip samma sätt som vid beställningspunktssystem enligt ovan. Tillvägagångssättet innebär att en tid i dagar motsvarande beräknat medel-

överdrag dividerat med medelefterfrågan per dag läggs till högerledet i ovanstående ekvation. På motsvarande sätt justeras också säkerhetstiden för att ta hänsyn till överdragsvariationer genom att ersätta den med en säkerhetstid som erhålls genom att dividera säkerhetslagret beräknat på samma sätt som för beställningspunktssystem med efterfrågan per dag. Eftersom även täcktdisplanering i praktiken är ett dagplanerande system på samma sätt som beställningspunktssystem, dvs i realiteten periodinspektionsbaserat med inspektionsperiod dag, kan samma justeringar som redovisades i avsnitt 4.1 användas för att ta hänsyn till detta inspektionsintervall.

Om täcktdisplanering används tillsammans med en fast orderkvantitet är det ett beställningspunktssystem av (s,Q) -typ. Täcktdisplanering kan emellertid också användas som ett beställningspunktssystem av (s,S) -typ. Återfyllnadsnivån i (s,S) -systemet motsvaras då av en maximal täcktid, dvs en täcktid som man maximalt vill att lagersaldot plus utlagda beställningar skall täcka. Orderkvantiteten vid varje beställningstillfälle beräknas som skillnaden mellan denna maximala täcktid och den täcktid som lagersaldot plus eventuellt redan utlagda beställningar täcker multiplicerat med efterfrågan per dag.

Eftersom täcktdisplanering med avseende på hantering av överdrag är identisk med beställningspunktssystem är de analyser och slutsatser som görs i den här studien för beställningspunktssystem följaktligen också tillämpliga för täcktdisplanering.

4.5 Överdrag vid materialbehovsplanering

Även materialbehovsplanering utan strukturnedbrytning utgör en typ av beställningspunktssystem. Metoden är följaktligen också i princip identisk med täcktdisplanering. I stället för att jämföra aktuellt lagersaldo med en beställningspunktskvantitet beräknas saldot dag för dag framåt i tiden och en ny beställning planeras in för leverans när saldot blir negativt. Beställningen läggs ut till leverantör ledtiden före dagen med negativt saldo. Hänsyn till säkerhetslager tas genom att före projicering av saldot framåt i tiden minska ineliggande lagersaldo med beräknad säkerhetslagerkvantitet. Överdrag kan följaktligen hanteras på i princip samma sätt som vid beställningspunktssystem enligt ovan. Tillvägagångssättet innebär att ineliggande lagersaldo minskas med uppskattat överdrag innan projicerat lager beräknas dag för dag. På motsvarande sätt som ovan justeras också säkerhetslagret för att ta hänsyn till överdragsvariationer.

Används fast orderkvantitet vid materialbehovsplanering kan metoden betraktas som ett beställningspunktssystem av (s,Q) -typ. Om man däremot använder ett fast antal dagars behov som partiformningsmetod och behovet under dessa dagar i genomsnitt motsvarar en ekonomisk orderkvantitet, kommer materialbehovsplanering i stället att motsvara ett beställningspunktssystem av (s,S) -typ. Detta framgår speciellt av att den behovskvantitet som uppstår i den period där det projicerade lagret blir negativt läggs till den ackumulerade kvantitet som krävs för att täcka det fastställda antalet dagars behov. Återfyllnadsnivån i (s,S) -systemet motsvaras av det maximala antalet dagars behov man vill ha i lager och förväntad inleverans från redan utlagda beställningar. Används någon av i övrigt förekommande dynamiska partiformningsmetoder är det snarast fråga om ett beställningspunktssystem av (s,Q) -typ men med varierande orderstorlekar från order till order.

Med avseende på hantering av överdrag är följaktligen materialbehovsplanering principiellt identiskt med beställningspunktssystem. De analyser och slutsatser som görs i den

här studien för beställningspunktssystem är följaktligen också tillämpliga för materialbehovsplanering.

5 Test och analys av överdrag och dess variation

De modeller som enligt kapitel 3 valts för att vid materialstyrning ta hänsyn till överdrag och dess variation är approximationer. För att få en uppfattning om hur användbara dessa approximationer är har teoretiskt beräknade överdrag jämförts med verkligt beräknade med hjälp av den simuleringsmodell som beskrevs i kapitel 2. Verkligt erhållit överdrag har beräknats som medelvärdet av de överdrag som erhållits vid varje tillfälle som beställningspunkter underskridits. Jämförelserna omfattar både den teoretiskt genererade efterfrågan och den som erhållits från fallföretagen.

Simuleringarna har omfattat 25 år av dagliga uttag och inleveranser för vardera av de tjugo artiklar som representerar respektive efterfrågestruktur. För den teoretiskt genererade efterfrågan har olika ledtider och orderkvantiteter på inleveranser testats. Inga skillnader har som förväntat noterats med avseende på olikheter i dessa båda avseenden. Resultat redovisas därför endast för ledtiden 10 dagar och orderkvantiteter motsvarande 20 dagars efterfrågan. För den efterfrågan som erhållits från fallföretagen har respektive artikels ledtid och orderkvantitet använts.

Erhållna resultat med avseende på medelvärden på överdrag redovisas i tabell 7 för den teoretiskt genererade efterfrågan. I tabellen visas också konfidensintervall för de teoretiskt beräknade överdragen med 95 % konfidensgrad. Dessa konfidensintervall kan tolkas så att 95 % av alla teoretiskt beräknade medelöverdrag ligger inom dessa intervallgränser.

Tabell 7 Jämförelser mellan teoretiskt beräknade och vid simulering erhållna medelöverdrag från den teoretiskt genererade efterfrågan

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Teoretiskt beräknat överdrag</i>	<i>Verkligt erhållit överdrag</i>	<i>Konfidensintervall Övre gräns</i>	<i>Konfidensintervall Undre gräns</i>
1	30,4	30,0	30,8	30,0
2	11,2	11,3	11,5	10,9
3	4,4	4,4	4,6	4,2
4	3,3	3,4	3,5	3,1
5	3,1	3,8	3,3	2,9
6	101,1	102,1	104,9	97,4
7	71,7	75,7	78,2	65,2
8	1,2	1,1	1,2	1,1
9	0,7	1,0	0,8	0,6

Som framgår av tabell 7 är överensstämmelsen mellan de överdrag som beräknats med hjälp av formel 1 ovan och de överdrag som erhållits vid simuleringarna mycket god. Det är endast för två av de efterfrågestrukturer som uppvisar störst efterfrågevariationer, dvs 5 och 9, som det överkligto erhållna överdraget ligger utanför det teoretiskt beräknade överdragets konfidensintervall. För praktiskt bruk är skillnaderna mellan teoretiskt erhållna och överkligto beräknade dessutom av marginellt intresse även för dessa efter-

frågestrukturer. Resultaten stöder sålunda de slutsatser som dragits av Tijms och Groenevelt (1984) och Baganha m fl (1996).

Med avseende på överdragens standardavvikelser har jämförelser gjorts mellan efterfrågans standardavvikelser per dag som teoretiska värden och överdragens standardavvikelser som erhållits vid simuleringarna som verkliga värden. Erhållna resultat redovisas i tabell 8. Tabellen inkluderar också de teoretiskt beräknade standardavvikelsernas konfidensintervall på motsvarande sätt som för medelöverdrag ovan.

Tabell 8 Jämförelser mellan teoretiskt beräknade och vid simulering erhållna standardavvikelser från den teoretiskt genererade efterfrågan

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Teoretisk beräknad standardavvik</i>	<i>Verkligt erhållen standardavvik</i>	<i>Konfidensintervall Övre gräns</i>	<i>Konfidensintervall Undre gräns</i>
1	19,6	21,1	20,0	19,1
2	10,7	9,2	11,1	10,3
3	4,4	4,1	4,6	4,2
4	2,0	2,9	2,1	1,8
5	1,0	2,6	1,1	0,8
6	93,7	84,5	97,1	90,3
7	20,6	44,3	23,7	17,6
8	1,5	1,3	1,6	1,5
9	0,3	0,8	0,4	0,3

Som framgår av tabellen är överensstämmelsen mellan teoretiskt och överkligt beräknade standardavvikelser inte lika god som motsvarande för överdragens medelvärden. I inget av fallen med de nio efterfrågestrukturerna ligger den överkliga standardavvikelsen inom den teoretiskt beräknade standardavvikelsens konfidensintervall. Med undantag för efterfrågestrukturerna med störst efterfrågevariation är skillnaderna för praktiskt bruk emellertid tämligen försumbara. För efterfrågestruktur 5, 7 och 9 blir den verkliga standardavvikelsen för stor jämfört med den teoretiskt beräknade vilket för den här typen av efterfrågesituationer kommer att medföra att säkerhetslagret och därmed erhållen servicenivå kan förväntas bli något för hög. Några påtagligt för stora värden behöver man emellertid inte räkna med eftersom överdragets variationer endast bidrar med en mycket liten del av beställningspunktens storlek.

För att få en uppfattning om hur stort överdragets betydelse kan vara har dess storlek beräknats i förhållande till den beställningspunkt som erhållits med hjälp av ett periodiskt beställningspunktssystem baserat på normalfördelning och utan hänsyn tagen till överdrag. De olika överdragens storlek i procent av beräknade beställningspunkter visas i tabell 9.

Tabell 9 Överdragens storlek i förhållande till motsvarande beställningspunkter i procent för de olika efterfrågestrukturerna och ledtiderna

Led- tid	Efterfrågestruktur								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	25	27	40	70	158	42	146	28	122
5	10	11	18	37	90	19	83	13	79
10	5	6	10	22	58	11	53	7	48
20	3	3	6	13	36	6	33	4	31
40	1	2	3	8	22	3	20	2	18

Av tabellen framgår att överdrag har en betydande storlek i förhållande till motsvarande beställningspunkter beräknade utan hänsyn till överdrag vid korta ledtider och varierande efterfrågan. Det är endast vid ledtider över 20 dagar och efterfrågestrukturerna 1, 2, 3, 6 och 8 som man kan tillåta sig att avstå från att ta hänsyn till överdrag om man vill uppnå erhållna servicenivåer som är i närheten av de önskade och som materialstyrningssystemet är dimensionerat för. För de mest varierande efterfrågestrukturerna och de kortaste ledtiderna är överdragen i samma storleksordning som motsvarande beställningspunkter eller större.

En jämförelse mellan teoretiskt beräknade medelöverdrag och överdrags standardavvikelser och motsvarande överkliga värden erhållna med hjälp av simulering har också gjorts för de fyra fallföretagen. Resultaten redovisas i tabell 10. För att kunna göra jämförelserna trots att de olika artiklarna har mycket varierande årsefterfrågan har de för varje företag sorterats efter fallande efterfrågan och slagits samman till grupper om 50 st. Det är medelvärden för var och en av dessa grupper som visas i tabellen.

Även för fallföretagens efterfrågan erhålls en mycket god överensstämmelse mellan teoretiskt beräknade överdrag och de överkliga överdrag som beräknats med hjälp av simulering. Det är endast för artikelgrupp 1 i företag C1 som det föreligger några nämnvärda skillnader. Det som karakteriserar denna artikelgrupp är stora kundorderkvantiteter och mycket korta ledtider. För alla övriga grupper är skillnaderna mindre än enstaka procent.

Skillnaderna i standardavvikelser är större men för merparten av artikelgrupperna rimligt acceptabla, speciellt med tanke på att överdragets variation, som påpekades ovan, har en mycket begränsad påverkan på beställningspunktens storlek. Vid värdering av skillnaderna bör man också beakta att artiklarna inom respektive grupp inte är särskilt homogena. Speciellt gäller detta grupperna med högst medelöverdrag, dvs grupp1 för varje företag. På motsvarande vis som för den teoretiskt genererade efterfrågan är skillnaderna störst för företag och grupperingar med stora efterfrågevariationer.

Tabell 10 Jämförelser mellan teoretiskt beräknade och vid simulering erhållna medelvärden och standardavvikelser för överdrag från fallföretagens efterfrågan

<i>Företag / Artikelgrupp</i>	<i>Teoretiskt medel- överdrag</i>	<i>Verkligt medel- överdrag</i>	<i>Std avvikelse Teoretiskt överdrag</i>	<i>Std avvikelse Verkligt överdrag</i>
Företag A				
1	24,8	24,9	18,7	23,1
2	8,2	8,2	6,5	8,1
3	3,3	3,2	2,3	3,6
4	1,1	1,1	1,0	1,4
5	0,3	0,3	0,4	0,6
Företag B				
1	622,1	614,0	460,0	545,1
2	80,9	79,7	56,7	75,8
3	26,3	26,2	17,1	21,8
4	6,9	6,9	3,3	5,7
5	1,2	1,1	0,8	1,1
Företag C1				
1	258,3	221,4	89,8	182,4
2	22,7	22,0	12,8	19,6
3	2,3	2,4	1,3	2,7
4	0,7	0,8	0,6	1,1
Företag C2				
1	23,5	24,5	13,4	21,3
2	3,2	3,2	2,4	3,6
3	1,8	1,9	1,7	2,2
4	1,0	1,0	1,0	1,4
5	0,4	0,4	0,5	0,7
Företag D				
1	165,5	160,8	99,5	161,2
2	44,2	43,4	33,0	42,9
3	20,7	20,5	15,1	19,5
4	4,9	5,0	2,7	5,0
5	0,5	0,5	0,5	0,7

6 Användning av alternativa efterfrågefördelningar

För att kunna beräkna säkerhetslager oavsett typ av materialstyrningsmetod måste man känna till eller kunna uppskatta efterfrågans fördelning. De fördelningar som använts i den här studien är normalfördelning, empirisk fördelning och gammafördelning. I följande avsnitt redovisas hur dessa fördelningar kan genereras och användas.

6.1 Normalfördelning

Den efterfrågefördelning som är mest använd både i litteraturen och vid materialstyrning i praktiken är normalfördelningen. Orsaken till detta är att normalfördelningen i allmänhet ganska väl återspeglar i verkligheten förekommande efterfrågefördelningar eftersom efterfrågevariationerna under ledtiden kan betraktas som sammansatta av flera

oberoende slumpmässigt inträffade händelser som adderas. Vissa forskare menar också att mervärdet av att använda andra fördelningar är litet, speciellt om man beaktar andra förenklande antaganden som görs vid beställningspunktsberäkning (Se exempelvis Naddor, 1978 och Fortuin, 1980). Dessutom är normalfördelningen från beräkningssynpunkt mycket attraktiv att använda.

En normalfördelning är bestämd av dess medelvärde och standardavvikelse.

I den här studien används en materialstyrningsmodell baserad på normalfördelning och utan hänsyn till överdrag som jämförelseobjekt för att utvärdera normalfördelning, empirisk fördelning och gammafördelning, i samtliga fall med hänsyn till överdrag. Följande tre materialstyrningsmodeller baserade på normalfördelning har ingått i studien:

- Beställningspunktssystem utan hänsyn till överdrag
- Periodiskt beställningspunktssystem utan hänsyn till överdrag
- Periodiskt beställningspunktssystem med hänsyn till överdrag

Beställningspunkterna i beställningspunktssystemet utan hänsyn till överdrag har beräknats med hjälp av följande formel.

$$BP = d * lt + k * \sigma(dag) * \sqrt{lt} \quad \text{.6}$$

där d = efterfrågan per dag
 lt = ledtiden i dagar
 $\sigma(dag)$ = standardavvikelsen per dag

Som framgår av formeln har efterfrågevariationernas standardavvikelse beräknats per dag och därefter ledtidskorrigerats i stället för att som vanligt beräkna den per månad eller motsvarande periodlängd och därefter justera för ledtidens längd i antal månader. Orsaken till att standardavvikelser per dag valts är att man på det sättet kan basera beräkningarna på ett betydligt större stickprov och därmed få korrektare värden och mindre variation (Mattsson, 2007).

Eftersom servicenivåbegreppet fyllnadsgrad använts har följande formel använts för att beräkna servicefunktionens värde.

$$\text{Servicefunktionen} = \frac{Q * (1 - SN)}{\sigma(dag) * \sqrt{lt}} \quad \text{.7}$$

där Q = orderstorleken
 SN = önskad servicenivå i form av fyllnadsgrad

Från servicefunktionens värde har därefter säkerhetsfaktorn erhållits med av en approximativ beräkningsmetod enligt Silver, Pyke och Peterson (1998, sid 736). Säkerhetsfaktorn kan också hämtas från tabeller över servicefunktionen.

Beställningspunkterna i det periodiska beställningspunktssystemet utan hänsyn till överdrag har beräknats med hjälp av följande formel.

$$BP = d * (lt + 0,5) + k * \sigma(dag) * \sqrt{lt + 0,5} \text{ é é é é é é é é é é é é é é é é } 8$$

där d = efterfrågan per dag
 lt = ledtiden i dagar
 $\sigma(dag)$ = standardavvikelsen per dag

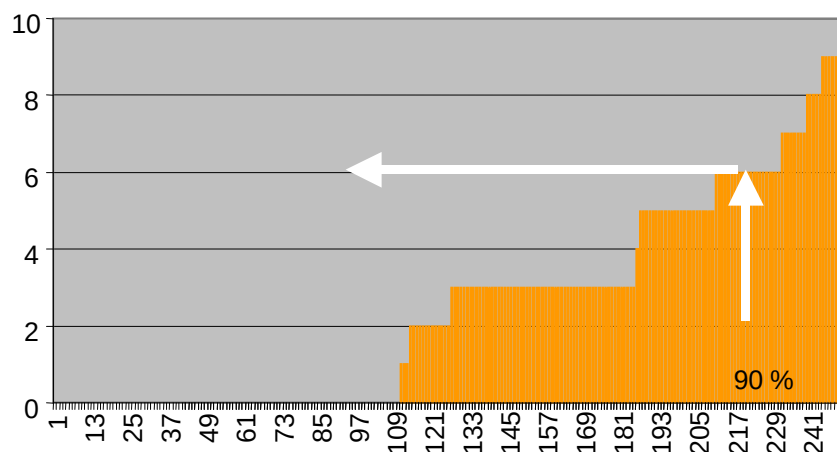
Tillägget av 0,5 till ledtiden är en kompensation för att jämförelser mellan saldon och beställningspunkter i periodiska beställningspunktssystem endast görs en gång per inspektionsintervall, i det här fallet 1 dag. För beräkning av säkerhetsfaktor används formel 7 men med skillnaden att 0,5 adderas till ledtiden i dagar.

För periodiskt beställningspunktssystem med hänsyn till överdrag måste medelöverdragets storlek och variation inkluderas i beställningspunkten. För att åstadkomma detta används formel 5 ovan. Även i det här fallet beräknas säkerhetsfaktorn med utgångspunkt från formel 7 med skillnaden att 1 dag adderas till ledtidens längd för att inkludera effekter av överdragets variationer.

6.2 Empirisk fördelning

Användning av standardfördelningar för att modellera efterfrågevariationer har fördelen att de är förhållandevis lätta att utföra beräkningar med. Att utgå från standardfördelningar innebär emellertid också svårigheter. Det är exempelvis svårt att veta i vilken utsträckning de på ett rimligt korrekt sätt representerar de verkliga efterfrågevariationerna. Graden av överensstämmelse kan också förändras över tiden. Ett sätt att slippa ifrån sådana problem är att i stället utgå från verklig efterfrågefördelning så som den varit historiskt, här kallad empirisk efterfrågefördelning.

För att generera en empirisk efterfrågefördelning måste först ett antal värden på efterfrågan under ledtid vid olika tidpunkter beräknas genom att summera daglig efterfrågan under det antal dagar som motsvarar ledtidens längd. Används servicenivåbegreppet cykelservice sorteras dessa beräknade ledtidsefterfrågevärden från lägsta till högsta värde. I figur 4 visas exempel på resultat som kan erhållas efter sådana beräkningar och sorteringar. I diagrammet anger y-axeln den verkliga efterfrågan under ledtid och x-axeln antal gånger som respektive efterfrågevärde förekommit.



Figur 4 Genererad efterfrågefördelning för att bestämma beställningspunkter

Sammanlagt innehåller diagrammet 250 ledtidsförbrukningar. Om man antar att önskad servicenivå fastställts till 90 %, dvs lagerbrist kan endast accepteras i 10 % av alla lagercykler, så bör man enligt diagrammet sätta beställningspunkten till 6 st. 90 % av alla ledtidsförbrukningar, dvs $0,9 \cdot 250 = 225$, kommer då att vara sex eller färre.

I litteraturen finns tre alternativa tillvägagångssätt för att generera empiriska efterfrågefördelningar presenterade. Samtliga utgår från historisk efterfrågan i form av faktiska utleveranser per period, exempelvis dag eller vecka. Ett av dessa tillvägagångssätt (Se exempelvis Brown, 1963 samt Hax och Candea, 1984) innebär att man delar in hela den tid från vilken man vill ta hänsyn till den historiska efterfrågan i icke-överlappande intervall vars längd är lika med ledtiden. För varje sådant intervall beräknas summa efterfrågan. Man får då ett antal ledtidsförbrukningar som motsvarar historikens kalendertid dividerat med ledtidens längd. Ledtidsförbrukningar som är lika stora antalsberäknas och man får en serie av tal, $n(d)$, där $n(d)$ är lika med antal efterfrågeförbrukningar med efterfrågan lika med d . Från denna talserie beräknas $p(d)$, dvs andelen ledtidsförbrukningar med efterfrågan lika med d , genom att dividera $n(d)$ med $\sum n(d)$ över alla d . Akkumulerade sannolikheter för att efterfrågan under ledtid skall överstiga en viss efterfrågan kan därefter beräknas och beställningspunkten fastställas med utgångspunkt från önskad servicenivå. Det finns också en teknik utarbetad för att successivt uppdatera de beräknade sannolikheterna i takt med att nya efterfrågeförbrukningar blir kända.

Ett likartat sätt att gå tillväga har utvecklats av Wilcox (1970, sid 51). Även denna metod utgår från historisk efterfrågan per period, exempelvis dag eller vecka. Från och med varje sådan period och över hela den kalendertid som man vill använda efterfrågehistoriken för att generera en efterfrågefördelning skapas ledtidsförbrukningar genom att summera efterfrågan över det antal perioder som motsvaras av ledtidens längd. Den första ledtidsförbrukningen blir lika med $\sum dp(k)$ från 1 till l , där $dp(k)$ är lika med efterfrågan i period k och l lika med ledtidens längd i perioder. Den andra ledtidsförbrukningen erhålls genom att på motsvarande sätt summera från period 2 till period $l+1$, den tredje genom att summera från period 3 till $l+2$ etc. På så sätt skapas ett antal ledtidsförbrukningar som motsvarar antalet historikperioder minus ledtidens längd i perioder plus ett. Beräkningsmetodiken är sedan den samma som för Browns metod.

Den tredje metoden bygger på en statistisk metodik som kallas bootstrapping. Den innebär att man bygger upp en fördelning genom att slumpmässigt välja och därefter kombinera observationer. Användning av metoden i det här sammanhanget har bland andra beskrivits av Bookbinder och Lordahl (1989, sid 302), Smart (2002) samt Smart och Willemain (2000, sid 64). Willemain, Smart och Schwarz (2004) har vidareutvecklat tekniken så att även fall med autokorrelerad efterfrågan kan hanteras.

Metoden utgår på samma sätt som de båda föregående från en följd av efterfrågedata per period. Ett slumpmässigt urval av lika många perioder som motsvaras av ledtidens längd görs därefter, dvs är ledtiden fyra perioder görs ett slumpmässigt urval av efterfrågevärden från fyra perioder. Summan av efterfrågan i dessa perioder beräknas och får representera en observation från efterfrågans fördelning under ledtiden. Det slumpmässiga urvalet upprepas ett stort antal gånger så att ett tillräckligt stort antal observationer kan erhållas. Urvalet sker med vad som inom statistiken kallas urval med återläggning, dvs alla perioder har lika stor sannolikhet att komma med vid varje urvalstillfälle. I ovan

nämnda referenser talas det om 10.000-tals urval. Ju fler urval, desto mer representativ blir efterfrågefördelningen. De beräknade ledtidsefterfrågevärdena, $n(d)$, och sannolikheterna, $p(d)$, beräknas därefter på samma sätt som för de båda metoderna ovan, likaså beräkningen av beställningspunkter.

Skillnaden mellan de tre metoderna är främst en fråga om hur många ledtidsefterfrågevärden man kan generera. När de väl tagits fram är beräkningsförfarandet detsamma. Jämförelsevis ställer den först nämnda metoden störst krav på att det finns en lång efterfrågehistorik för att kunna få ett acceptabelt antal ledtidsförbrukningar att basera beställningspunktsberäkningen på och den sistnämnda metoden minst krav. Det är framför allt i detta avseende som bootstrappingmetodens styrka ligger. Små krav på en lång efterfrågehistorik är speciellt en fördel i de fall det förekommer efterfrågetrender eller andra former av systematiska efterfrågeförändringar. Sådana systematiska förändringar gör att endast en mycket begränsad efterfrågehistorik kan vara representativ för den framtida efterfrågefördelningen.

Den förstnämnda metoden är enklast att förstå och den kräver minst omfattande och komplicerade beräkningar, speciellt i jämförelse med bootstrappingmetoden. Till bootstrappingmetodens nackdelar hör att den är något komplexare än de båda övriga och att hänsyn inte kan tas till förekommande korrelation mellan efterfrågan från period till period utom för den mest komplexa varianten eftersom efterfrågevärden slumpmässigt hämtas från alla efterfrågehistorikens perioder när en ledtidsförbrukning skapas. För de båda övriga metoderna summeras efterfrågevärden från intilliggande perioder.

Ingen av de tre metoderna medför några problem om ledtiden förändras, förutsatt att efterfrågehistoriken lagras per period och inte per ledtidsintervall. Det är bara att göra om beräkningarna för den nya ledtiden. Eftersom det i den här studien inte föreligger någon autokorrelation har bootstrappingmetoden valts för generering av empirisk efterfrågan. 2000 efterfrågevärden har slumpats fram vid varje beställningspunktsberäkning.

I litteraturen publicerade metoder för att beräkna beställningspunkter med hjälp av empirisk fördelning bygger på att man använder cykelservice som definition på servicenivå. Detta servicenivåmått har emellertid ett antal nackdelar, exempelvis att det inte tar hänsyn till hur ofta inleveranser sker vilket i sin tur medför att leveransförmågan blir sämre för högomsatta än för lågomsatta artiklar vid samma servicenivå. Av detta skäl har en ny metod för att beräkna säkerhetslager med hjälp av empirisk efterfrågefördelning som möjliggör användning av fyllnadsgrad som servicenivåmått utvecklats.

Beställningspunktsberäkningen genomförs då på följande sätt. Om önskad servicenivå betecknas med SN gäller följande samband.

$$1 - SN = \frac{bk\hat{a}}{d} = \frac{n * bkc}{d} = \frac{d * bkc}{Q * d} = \frac{bkc}{Q}$$

där $bk\hat{a}$ = bristkvantitet per år
 bkc = bristkvantitet per lagercykel
 d = efterfrågan per år
 n = antal lagercykler per år
 Q = orderkvantitet per inleverans

Följaktligen är acceptabel bristkvantitet per lagercykel $bkc = Q * (1 - S)$.

För var och en av en successiv följd av beställningspunkter beräknas därefter skillnaden mellan var och en av de genererade ledtidsefterfrågevärdena och respektive beställningspunkt. Är denna skillnad större än noll innebär det att brist skulle uppstå för denna ledtidsefterfrågan. Medelvärde av alla bristkvantiteter för respektive beställningspunkt beräknas därefter. Detta medelvärde representerar förväntad bristkvantitet per lagercykel.

Beräkningarna kan uttryckas med hjälp av följande formel.

$$E bkc(s) = \sum_{x/x \geq s} (x - s) * p(x)$$

där $E bkc(s)$ = förväntad bristkvantitet per lagercykel när beställningspunkten är lika med s
 x = ledtidsefterfrågan
 s = beställningspunkt
 $p(x)$ = sannolikheten för att en viss ledtidsefterfrågan inträffar

Eftersom samtliga ledtidsefterfrågevärden jämförs med respektive beställningspunkt kommer $p(x)$ att vara konstant och lika med 1 dividerat med antalet ledtidsefterfrågevärden.

Den beställningspunkt vars förväntade bristkvantitet närmst motsvarar den bristkvantitet som enligt ovan beräknats från önskad servicenivå är den beställningspunkt som ger en servicenivå motsvarande den önskade. Formelmässigt är detta detsamma som att söka

$$\min |E bkc(s) - bkc| \quad \text{över alla } s.$$

För att ta hänsyn till överdrag beräknas först beställningspunkten baserat på den empiriska efterfrågefördelningen enligt ovan med skillnaden att ledtiden ökas med en dag för att kunna ta hänsyn till överdragets variationer och motiverat på samma sätt som vid användning av normalfördelning. Genom att göra på det här sättet kan man väga samman effekterna av efterfrågans variationer och överdragets variationer på säkerhetslagret. Beställningspunkten med full hänsyn till både överdragets medelstorlek och variation beräknas därefter med hjälp av följande formel.

$$BP = BP(\text{empirisk}) - d + \mu_{\text{överdrag}}$$

där BP = beställningspunkten
 $BP(\text{empirisk})$ = beställningspunkten med empirisk fördelning och en ledtid som är en dag längre än den egentliga ledtiden
 d = efterfrågan per dag
 $\mu_{\text{överdrag}}$ = medelöverdraget

Eftersom $BP(\text{empirisk})$ beräknas med ett ledtidstillägg på en dag måste denna dags efterfrågan dras ifrån det beräknade värdet. Medelöverdraget beräknas med hjälp av formel 1.

6.3 Gammafördelning

Som framgått ovan har normalfördelningen en del användarmässiga begränsningar. (Lau, 1989 samt Razi och Tarn, 2003). Speciellt gäller detta vid stora efterfrågevariationer eftersom normalfördelningen är symmetrisk kring sitt medelvärde och vid korta ledtider då den riskerar att inkludera negativa efterfrågevärden. Vad som händer vid korta ledtider illustrerades i figur 2.

För att lösa problemet med att normalfördelningen också omfattar negativa värden har två olika modeller som modifierar normalfördelningen, i ena fallet genom att helt bortse från den del av efterfrågan som är negativ och i den andra genom att öka den positiva efterfrågan med den negativa (Strijbosch och Moors, 2006). Modellerna är emellertid mycket komplexa vilket medför att de beräkningsmässiga fördelar som föreligger för normalfördelningen helt går förlorade. De utgör dessutom fortfarande mycket grova approximationer och är inte bättre än den äkta normalfördelningen vad gäller att kunna hantera efterfrågevariationer som är osymmetriska kring sitt medelvärde.

Ett intressantare alternativ är gammafördelningen. Denna fördelning löser både problemet med att inte ge negativa efterfrågevärden och den modellerar osymmetriska efterfrågefördelningar med snedfördelning mot stora efterfrågevärden. Fördelningen är känd sen mycket länge bland statistiker och finns beskriven i logistiklitteraturen sedan tidigt 70-tal. Den finns exempelvis tabellerad av Burgin och Norman i en artikel från 1976.

Gammafördelningens frekvensfunktion har följande utseende.

$$f(x) = \frac{\alpha^k * x^{k-1} * e^{-\alpha * x}}{\Gamma(k)}$$

där $\Gamma(k)$ är lika med gammafunktionen. För de ingående parametrarna gäller att $0 \leq x \leq \infty$, $\alpha > 0$ och $k > 0$. Se exempelvis Burgin (1975) och Keaton (1995).

Fördelningens medelvärde och standardavvikelse är

$$\mu = \frac{k}{\alpha} \text{ respektive } \sigma = \sqrt{\frac{k}{\alpha^2}}$$

Från dessa samband kan parametrarna i gammafördelningen beräknas enligt följande.

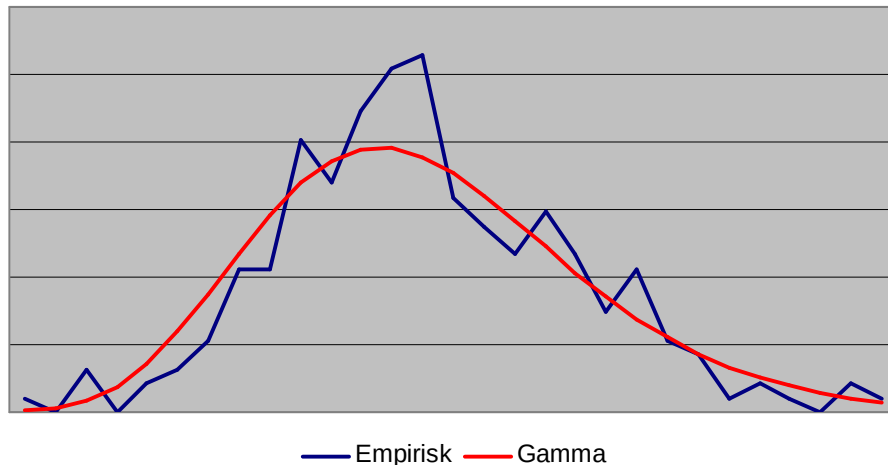
$$k = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \text{ och } \alpha = \frac{\mu}{\sigma^2}, \text{ dvs de kan bestämmas genom att uppskatta medelefterfrågan}$$

under ledtid och efterfrågans standardavvikelse under ledtid.

I motsats till normalfördelningen som är definierad från minus oändligheten till plus oändligheten, dvs även inkluderar negativ efterfrågan, är gammafunktionen endast definierad för positiva tal. Genom att den inte är symmetrisk kring sitt medelvärde kan den också förväntas representera lågrörlig efterfrågan på ett bättre sätt än normalfördelning-

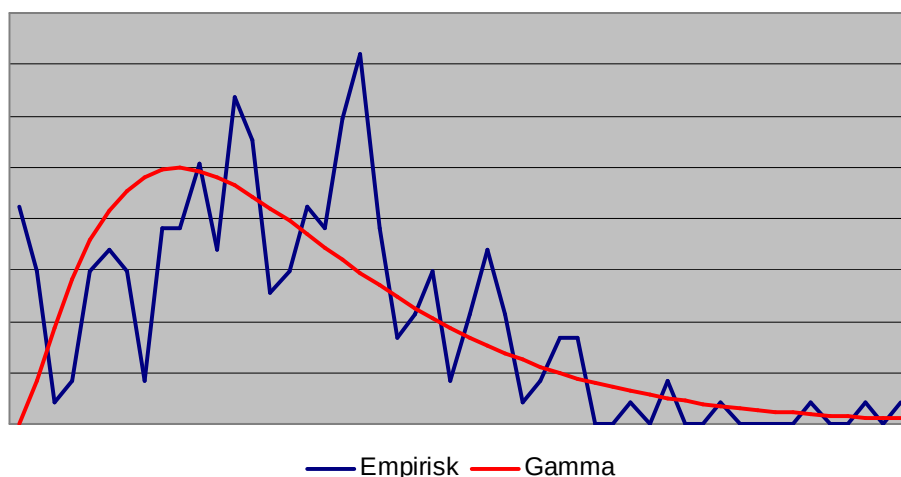
en. Gammafördelningen tenderar att mer och mer motsvara normalfördelningen ju större k är, dvs ju större medelefterfrågan är i förhållande till dess standardavvikelse.

För att illustrera hur gammafördelningen ser ut i förhållande till den empiriska fördelningen har grafer över respektive fördelningsfunktion tagits fram. Exempel på sådana visas i figur 5, 6 och 7 för efterfrågestruktur 2, 3 respektive 4 och ledtider på 5 dagar.



Figur 5 Utseende på den empiriska frekvensfunktionen och gammafördelningens frekvensfunktion (den jämna linjen) för efterfrågestruktur 2 med 3 order per dag.

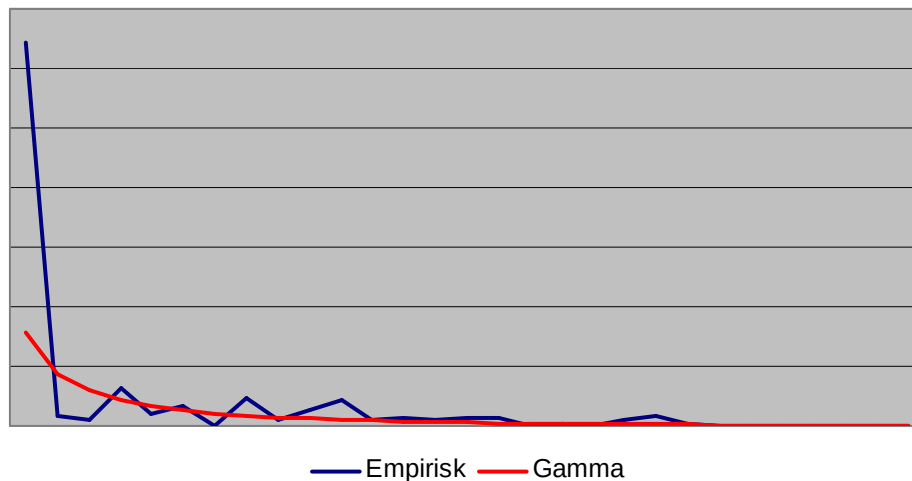
Som framgår av figurerna är gamma funktionen mycket lik normalfördelningsfunktionen vid låga efterfrågevariationer, som en önsad normalfördelning^o vid lite högre efterfrågevariationer och som en Poissonliknande fördelning vid höga efterfrågevariationer.



Figur 6 Utseende på den empiriska frekvensfunktionen och gammafördelningens frekvensfunktion (den jämna linjen) för efterfrågestruktur 3 med 1 order per 2 dagar.

Figurerna visar också att det finns en god överensstämmelse mellan den empiriska fördelningens frekvensfunktion och gammafördelningens frekvensfunktion, speciellt för fallen med mindre efterfrågevariationer. För fallet med endast 1 order per två veckor

och som en konsekvens hög efterfrågevariation blir frekvensfunktionen för gammafördelningen lägre än motsvarande för den empiriska efterfrågefördelningen för låga efterfrågevärden. Detta beror på att andelen ledtidsefterfrågeintervall med ingen efterfrågan är mycket större än vad gammafördelningen ger. I stället täcker gammafördelningen betydligt större ledtidsefterfrågevärden än den empiriska efterfrågefördelningen (framgår delvis av figur 8). Förhållandet leder till att gammafördelningen kan förväntas ge något för stora beställningspunkter och därmed för höga servicenivåer.



Figur 7 Utseende på den empiriska frekvensfunktionen och gammafördelningens frekvensfunktion (den jämna linjen) för efterfrågestruktur 4 med 1 order per 2 veckor.

För att beräkna sannolikheten att efterfrågan inte överskrider en viss beställningspunktskvantitet, dvs att brist inte inträffar under en lagercykel, finns olika approximativa formler presenterade i litteraturen (Keaton, 1995 och Burgin, 1975). Sannolikheten kan också beräknas med hjälp av standardfunktioner i Excel. (GAMMAFÖRD($x; \alpha; \beta; \text{sant}$)) där α motsvarar k och β $\bar{U}$. Dessa sätt att beräkna sannolikheter har emellertid det gemensamt att de endast kan användas när servicenivån definierats som cykelservice. För att kunna utgå från servicenivådefinitionen fyllnadsgrad har en metod baserad på en approximativ beräkningsformel som utvecklats av Tyworth, Guo och Ganeshan (1996) valts och vidareutvecklats för att kunna användas i det här sammanhanget. Denna metodik använder sig av ovannämnda Excel funktion. Beställningspunktsberäkningen genomförs på följande sätt.

Om önskad servicenivå betecknas med SN gäller följande samband enligt kapitel 6.2.

$$bkc = Q * (1 - SN).$$

För var och en av en successiv följd av beställningspunkter beräknas därefter förväntad bristkvantitet per lagercykel när beställningspunkten är s med hjälp av följande formel.

$$Ebkc(s) = \alpha * \beta * (1 - \text{GAMMAFÖRD}(s, \alpha + 1, \beta, \text{sant})) - s * (1 - \text{GAMMAFÖRD}(s, \alpha, \beta, \text{sant}))$$

där $Ebkc(s)$ = förväntad bristkvantitet per lagercykel när beställningspunkten är lika med s
 s = beställningspunkten

Den beställningspunkt vars förväntade bristkvantitet närmst motsvarar den bristkvantitet som enligt ovan beräknats från önskad servicenivå är den beställningspunkt som ger en servicenivå motsvarande den önskade. Formelmässigt är detta detsamma som att söka

$$\min |E_{bkc}(s) - bkc| \quad \text{över alla } s$$

Testberäkningar visade, vilket påpekades ovan, att gammafördelningar tenderar att ge för höga beställningspunkter vid mycket stora efterfrågevariationer. För att undvika dessa alltför höga beställningspunkter har en kompletterande begränsningsregel använts. Denna innebär att beställningspunkter aldrig tillåts bli större än vad de skulle bli om ett periodiskt beställningspunktssystem baserat på normalfördelning och med en säkerhetsfaktor på 3 skulle använts.

För att också ta hänsyn till överdrag beräknas först standardavvikelsen under ledtid med ett tillägg på en dag för att inkludera överdragets variationer i säkerhetslagerberäkningen. Med hjälp av detta värde på standardavvikelsen och baserat på medelefterfrågan under ledtid beräknas därefter beställningspunkten enligt ovan. Till den sålunda beräknade beställningspunkten adderas därefter medelöverdraget enligt formel 1. Formeln för att beräkna beställningspunkter från gammafördelning med hänsyn tagen till överdrag blir därför enligt följande.

$$BP = BP(\text{gamma}) + \mu_{\text{överdrag}}$$

där BP = beställningspunkten
 $BP(\text{gamma})$ = beställningspunkten med gammafördelning och med en standardavvikelse baserad på efterfrågevariationer under ledtid plus en dag
 $\mu_{\text{överdrag}}$ = medelöverdraget

7 Analys av erhållna beställningspunkter

För den teoretiskt genererade efterfrågan har beställningspunkter, medelvärden såväl som standardavvikelser, beräknats med hjälp av var och en av de beräkningsmodeller som redovisades i föregående kapitel. Beräkningarna har genomförts för var och en av ledtiderna 2, 5, 10, 20 och 40 dagar. Orderstorleken har genomgående satts till motsvarande 20 dagars efterfrågan. Erhållna beställningspunkters medelvärden för ledtiderna 5 och 20 dagar presenteras i tabell 11 respektive 12.

Tabell 11 Erhållna beställningspunkter i medeltal beräknade med olika metoder och med en ledtid på 5 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Beställningspunktssystem</i>	<i>Periodinspektions-system</i>	<i>Best. punktsystem med överdrag</i>	<i>Gammalförd. med överdrag</i>	<i>Emp. fördeln. med överdrag</i>
1	266	295	299	299	299
2	89	98	102	104	103
3	22	24	28	31	30
4	8	9	12	19	16
5	4	4	7	10	11
6	480	525	609	634	640
7	85	91	163	163	235
8	8	8	9	13	10
9	1	1	2	3	4

Tabell 12 Erhållna beställningspunkter i medeltal beräknade med olika metoder och med en ledtid på 20 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Beställningspunktssystem</i>	<i>Periodinspektions-system</i>	<i>Best. punktsystem med överdrag</i>	<i>Gammalförd. med överdrag</i>	<i>Emp. fördeln. med överdrag</i>
1	1126	1154	1159	1160	1159
2	363	372	376	379	377
3	78	80	83	89	86
4	25	25	28	37	33
5	10	11	14	20	19
6	1735	1775	1854	1954	1902
7	225	229	300	336	392
8	28	28	29	33	30
9	4	4	4	5	6

Som framgår av de båda tabellerna blir beställningspunkterna högre när metoderna med hänsyn till överdrag används. Skillnaderna är störst vid korta ledtider och stora efterfrågevariationer, speciellt för efterfrågestrukturerna 5, 7 och 9. Skillnaderna mellan de tre metoder som tar hänsyn till överdrag är marginell vid små efterfrågevariationer, se exempelvis efterfrågestruktur 1. De är också mindre ju längre ledtiderna är. Vid stora efterfrågevariationer är däremot skillnaderna inte försumbara. Resultaten är förväntade eftersom överdragets relativa betydelse minskar med ökande beställningspunkter och därmed med ledtidens längd. Normalfördelningen stämmer enligt ovan också allt sämre ju kortare ledtiderna är och desto mer efterfrågan varierar. För den i analyserna längsta ledtiden, dvs den på 40 dagar, är skillnaderna i beställningspunkter för efterfrågestruktur 1 och 2 praktiskt taget försumbara för alla metoder.

Motsvarande resultat för beräknade beställningspunkters standardavvikelser redovisas i tabell 13 och 14. Dessa standardavvikelser har beräknats från de månatligen beräknade beställningspunkterna under de 6000 dagar som simuleringarna omfattat. De är ett uttryck för hur mycket beställningspunkternas storlek varierar från månad till månad.

Tabell 13 Standardavvikelser för erhållna beställningspunkter beräknade med olika metoder och med en ledtid på 5 dagar

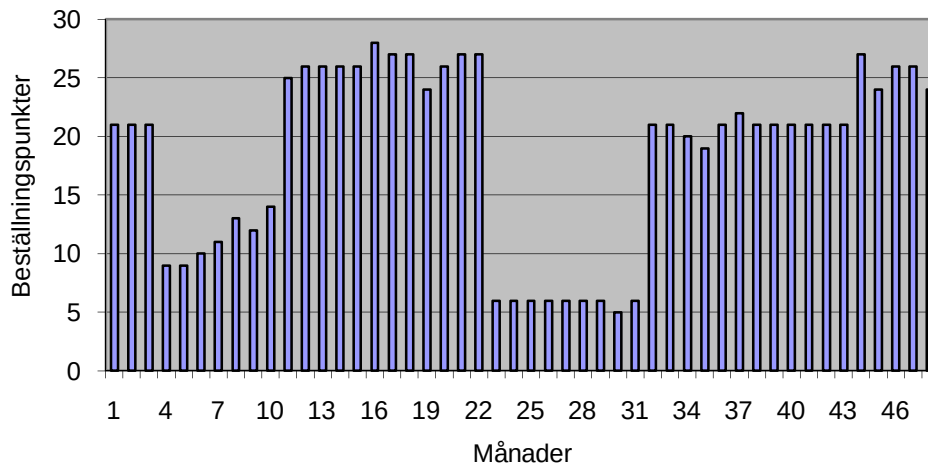
<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Beställnings-Punktssystem</i>	<i>Period-inspektions-system</i>	<i>Best. punktsystem med överdrag</i>	<i>Gamma-förd. med Överdrag</i>	<i>Emp. fördelning med överdrag</i>
1	6,9	7,6	7,8	7,8	7,9
2	4,3	4,7	4,9	5,1	5,0
3	2,3	2,6	2,8	3,2	3,1
4	1,7	1,8	2,1	3,3	2,7
5	1,5	1,6	2,2	3,0	3,0
6	46,9	51,0	54,9	63,0	60,2
7	28,2	30,1	38,4	44,1	52,8
8	0,8	0,9	0,9	0,8	1,0
9	0,6	0,6	0,7	0,8	1,1

Tabell 14 Standardavvikelser för erhållna beställningspunkter beräknade med olika metoder och med en ledtid på 20 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Beställnings-Punktssystem</i>	<i>Period-inspektions-system</i>	<i>Best. punktsystem med överdrag</i>	<i>Gamma-förd. med överdrag</i>	<i>Emp. fördelning med överdrag</i>
1	27,3	27,9	28,0	28,1	28,2
2	16,1	16,5	16,6	16,8	16,8
3	7,9	8,0	8,2	8,6	8,5
4	4,9	5,1	5,3	6,3	5,8
5	3,9	3,9	4,5	6,2	5,7
6	160,4	164,0	166,6	174,0	172,4
7	74,7	76,0	82,8	95,7	102,3
8	2,6	2,6	2,7	2,6	2,8
9	1,3	1,3	1,4	1,6	2,0

Av tabellerna framgår att standardavvikelserna blir något större för de metoder i vilka hänsyn tas till överdrag. Speciellt gäller detta fallen med kortare ledtider. Med tanke på att beställningspunkternas medelvärden är större när dessa metoder används är detta förväntat och för dess variationskoefficienter, dvs förhållandet mellan beställningspunkternas standardavvikelser och medelvärde, är skillnaderna praktiskt sett av marginellt intresse.

Från resultaten i de fyra tabellerna kan man också notera att beställningspunkterna varierar avsevärt från månad till månad. Varierande beställningspunkter leder i sin tur till variationer i erhållna servicenivåer och därmed variationer i vilken utsträckning man kan serva sina kunder på ett konsekvent och utlovat sätt. Speciellt gäller detta artiklar med stora efterfrågevariationer. För att illustrera dessa variationer visas i figur 9 hur beställningspunkterna varierar under 48 månader för en artikel med stora efterfrågevariationer från ett av fallföretagen. Beställningspunkterna beräknades med hjälp av empirisk fördelning.



Figur 8 Variationer i beräknade beställningspunkter för en artikel från en av fallföretagen.

För att studera i vilken utsträckning beräknade beställningspunkter och dess variationer påverkas av att de utjämnas genom att vägas samman över ett antal månader har effekter av beställningspunktsutjämning studerats. Utjämningen har åstadkommit med hjälp av exponentiell utjämning och inneburit att varje nyberäknad beställningspunkt vägs samman med hittills gällande beställningspunkt med hjälp av följande formel.

$$BP - nästa = \alpha * BP - ny + (1 - \alpha) * BP - gammal$$

där α = utjämningskonstanten

Utgjämningskonstanter på 0,1, 0,2 och 0,3 har testats och av dessa gav 0,1 bäst resultat. Dessa värden redovisas därför här, dels för gammafördelning, dels för empirisk fördelning. Se tabell 15 och 16. Beräkningarna avser efterfrågefall med en ledtid på 10 dagar och en orderkvantitet motsvarande 20 dagars efterfrågan.

Tabell 15 Medelvärden och standardavvikelser för beställningspunkter utan respektive med utjämning och beräknade med hjälp av gammafördelning och hänsyn tagen till överdrag

Efterfrågestruktur	Bpt utan utjämning		Bpt med utjämning		Skillnad i %	
	Medel	Stdav	Medel	Stdav	Medel	Stdav
1	587	14,6	588	9,3	0,0	36,3
2	197	9,0	197	6,1	-0,3	32,2
3	52	5,1	52	3,2	-1,0	37,3
4	26	4,3	26	2,7	-1,6	37,2
5	14	4,3	14	2,5	-2,9	41,9
6	1122	101,0	1122	64,8	0,0	35,8
7	230	63,7	230	40,5	-0,2	36,4
8	20	1,4	20	0,4	0,0	71,4
9	4	1,1	4	0,1	-8,1	90,9

Tabell 16 Medelvärden och standardavvikelser för beställningspunkter utan respektive med utjämning och beräknade med hjälp av empirisk fördelning och hänsyn tagen till överdrag

Efterfrågestruktur	Bpt utan utjämning		Bpt med utjämning		Skillnad i %	
	Medel	Stdav	Medel	Stdav	Medel	Stdav
1	587	14,7	587	9,2	0,0	37,4
2	196	9,0	196	6,0	-0,3	33,3
3	49	4,9	50	3,1	-1,0	36,7
4	22	3,7	22	2,2	-1,8	40,5
5	14	4,1	15	2,3	-2,8	43,9
6	1079	99,1	1079	62,8	0,0	36,6
7	295	73,9	295	45,5	-0,1	38,4
8	17	1,6	17	0,6	-1,2	62,5
9	5	1,5	5	0,2	-4,2	86,7

Av analysresultaten framgår att skillnaderna i medelvärden mellan beställningspunkter med och utan utjämning i huvudsak är försumbara, både för gammafördelning och empirisk fördelning. Det är endast för efterfrågestruktur 5 och 9 som skillnader av intresse kan noteras. I båda fallen är det fråga om förhållandevis mycket låga beställningspunkter och skillnaderna beror på avrundningseffekter vid beräkningen med hjälp av exponentiell utjämning.

Däremot är skillnaderna mellan hur mycket beställningspunkterna varierar uttryckta som standardavvikelser inte försumbara. För merparten av efterfrågestrukturerna blir standardavvikelsena utan utjämning mellan 30 och 40 % större än motsvarande utjämnade beställningspunkter. För övriga efterfrågestrukturer, dvs för de två, 8 och 9, som representerar reservdelsliknade förhållanden, betydligt större. Eftersom variationer i beställningspunkter leder till oönskade variationer i servicenivåer kan man sålunda konstatera att utjämning vid beräkning av beställningspunkter kan vara ett effektivt hjälpmedel för att säkerställa en jämnare lagerservicenivå.

8 Analys av erhållna servicenivåer

Med hjälp av den simuleringsmodell i Excel som beskrevs i kapitel 2 har erhållna servicenivåer beräknats vid användning av fem olika lagerstyrningsmodeller; beställningspunktssystem baserat på normalfördelning och utan hänsyn till överdrag, periodiskt beställningssystem baserat på normalfördelning och utan hänsyn till överdrag, periodiskt beställningspunktssystem baserat på normalfördelning med hänsyn till överdrag, periodiskt beställningspunktssystem baserat på gammafördelning med hänsyn till överdrag samt periodiskt beställningspunktssystem baserat på empirisk fördelning med hänsyn till överdrag. Eftersom de två första lagerstyrningsmodellerna är modeller som vanligtvis används i företag, har de inkluderats för att kunna utvärdera vilka resultat man kan uppnå med hjälp av de modeller som utvecklats i det här projektet.

Simuleringar har genomförts både med avseende på den teoretiskt genererade efterfrågan och med avseende på den efterfrågan som erhållits från fallföretagen. I samtliga fall har de omfattat dagliga uttag och inleveranser under 25 år och utgått från en önskad ser-

vicenivå på 98 %. Med andra ord har beställningspunkterna med respektive lagerstyrningsmodeller beräknats med utgångspunkt från en servicenivå på 98 %. Orderstorleken på inleveransorder har genomgående satts till motsvarande 20 dagars förbrukning.

8.1 Analys och resultat från den teoretiskt genererade efterfrågan

Erhållna servicenivåer i procent i medeltal under de simulerade 25 åren för den teoretiskt genererade efterfrågan med hjälp av de fem lagerstyrningsmodellerna enligt ovan samt för var och en av nio olika efterfrågestrukturer och var och en av fem olika ledtider redovisas i tabell 17 i 21.

Tabell 17 Erhållna medelservicenivåer i procent för den teoretiskt genererade efterfrågan vid en ledtid på 2 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Normalförd. Kontinuerlig</i>	<i>Normalförd. Periodisk</i>	<i>Normalförd. Överdrag</i>	<i>Gammaförd. Överdrag</i>	<i>Empir. förd. Överdrag</i>
1	95,7	97,8	98,0	98,0	98,0
2	95,8	97,5	98,1	98,2	98,2
3	94,3	95,9	97,7	98,6	98,3
4	87,7	89,8	96,0	98,7	98,2
5	65,0	68,6	90,0	96,7	97,7
6	94,2	95,8	97,8	98,4	98,1
7	69,3	72,7	93,8	97,0	98,0
8	95,3	96,7	97,9	98,8	98,4
9	76,3	78,7	90,7	96,8	98,3

Tabell 18 Erhållna medelservicenivåer i procent för den teoretiskt genererade efterfrågan vid en ledtid på 5 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Normalförd. Kontinuerlig</i>	<i>Normalförd. Periodisk</i>	<i>Normalförd. Överdrag</i>	<i>Gammaförd. Överdrag</i>	<i>Empir. förd. Överdrag</i>
1	96,1	97,8	98,0	98,0	98,0
2	96,3	97,6	98,0	98,2	98,1
3	95,4	96,3	97,5	98,5	98,0
4	90,8	91,8	96,1	98,9	98,1
5	77,7	79,5	92,4	96,9	97,9
6	95,5	96,5	97,8	98,5	98,2
7	81,6	83,1	94,7	97,8	98,0
8	95,9	96,9	97,7	98,7	98,3
9	84,4	86,0	93,3	97,3	98,4

Tabell 19 Erhållna medelservicenivåer i procent för den teoretiskt genererade efterfrågan vid en ledtid på 10 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Normalförd. Kontinuerlig</i>	<i>Normalförd. Periodisk</i>	<i>Normalförd. Överdrag</i>	<i>Gammaförd. Överdrag</i>	<i>Empir. förd. Överdrag</i>
1	96,1	97,8	98,0	98,0	98,0
2	96,3	97,6	98,0	98,1	98,1
3	95,4	96,3	97,5	98,4	98,0
4	90,8	91,8	96,1	99,1	98,1
5	77,7	79,5	92,4	97,6	97,9
6	95,5	96,5	97,8	98,4	98,2
7	81,6	83,1	94,7	98,1	98,0
8	95,9	96,9	97,7	98,5	98,3
9	84,4	86,0	93,3	97,6	98,3

Tabell 20 Erhållna medelservicenivåer i procent för den teoretiskt genererade efterfrågan vid en ledtid på 20 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Normalförd. Kontinuerlig</i>	<i>Normalförd. Periodisk</i>	<i>Normalförd. Överdrag</i>	<i>Gammaförd. Överdrag</i>	<i>Empir. förd. Överdrag</i>
1	96,6	97,7	97,8	97,9	97,9
2	96,8	97,5	97,8	98,0	97,9
3	96,2	96,5	97,3	98,2	97,9
4	93,6	93,9	96,3	99,0	98,2
5	89,9	90,3	94,8	98,1	98,2
6	96,0	96,5	97,2	98,1	97,7
7	89,7	90,1	95,4	98,6	98,4
8	96,4	96,8	97,3	98,3	97,8
9	91,6	92,0	94,5	98,4	98,7

Tabell 21 Erhållna medelservicenivåer i procent för den teoretiskt genererade efterfrågan vid en ledtid på 40 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Normalförd. Kontinuerlig</i>	<i>Normalförd. Periodisk</i>	<i>Normalförd. Överdrag</i>	<i>Gammaförd. Överdrag</i>	<i>Empir. förd. Överdrag</i>
1	96,7	97,6	97,7	97,7	97,8
2	96,7	97,3	97,5	97,7	97,7
3	96,1	96,4	97,0	97,9	97,8
4	92,1	94,6	96,3	98,9	98,3
5	92,0	93,5	95,9	99,4	98,9
6	96,1	96,5	97,2	97,9	97,7
7	92,5	92,8	96,2	99,6	99,1
8	96,3	96,6	97,2	98,0	97,8
9	88,4	92,6	95,4	99,5	99,1

Av de fem tabellerna framgår att de materialstyrningsmodeller för vilka hänsyn tas till överdrag samtliga ger en högre erhållen servicenivå än de utan sådan. I samtliga fall är dessutom skillnaderna signifikanta på 0,5%-nivån i förhållande till periodiskt beställningssystem utan hänsyn till överdrag.

Enligt bedömningar gjorda av från fallföretagen deltagande personer betraktas erhållna servicenivåer på +/- en procentenhet jämfört med den servicenivå materialstyrningssystemet dimensionerats för vara en fullt acceptabel felmarginal. I det här fallet skulle följaktligen erhållna servicenivåer på från 97 till 99 % vara fullt godtagbara. För de olika materialstyrningsmodellerna kan då följande slutsatser dras.

Beställningspunktssystem baserat på normalfördelning utan hänsyn till överdrag: För samtliga fall av efterfrågestrukturer och ledtider fås oacceptabelt låga servicenivåer.

Periodiskt beställningspunktssystem baserat på normalfördelning utan hänsyn till överdrag: Endast efterfrågestrukturerna 1 och 2 ger acceptabla servicenivåer, dvs endast för efterfrågefall med mycket jämn efterfrågan är periodisk beställningspunkt baserad på normalfördelning rimlig att använda utifrån den bedömningsnorm som tillämpas här. Som framgick av tabell 1 är det också endast dessa två efterfrågestrukturer som uppfyller det vanligt tillämpade kriteriet om att variationskoefficienten skall vara mindre än 0,5 för att normalfördelning skall vara tillämpbar.

Periodiskt beställningspunktssystem baserat på normalfördelning med hänsyn till överdrag: Om det periodiska beställningspunktssystemet kompletteras med hänsyn till överdrag blir det användbart även för efterfrågefall med något mer varierande efterfrågan, dvs utöver för efterfrågestrukturerna 1 och 2 fås också acceptabla servicenivåer för efterfrågestrukturerna 3, 6 och 8. För de efterfrågefall som innebär ytterligare större efterfrågevariationer är materialstyrningsmodellen inte lämplig att använda med den bedömningsnorm som tillämpas här. Med tanke på variationskoefficienternas storlek för olika efterfrågestrukturer och ledtider enligt tabell 1 kan man i grova drag säga att materialstyrningsmodellen endast är tillämpbar om efterfrågans variationskoefficient under ledtiden är cirka 1 eller mindre.

Periodiskt beställningspunktssystem baserat på gammafördelning med hänsyn till överdrag: Används gammafördelning för det periodbaserade beställningspunktssystemet och hänsyn även tas till överdrag är det endast för efterfrågestruktur 5 och 9 vid en ledtid på 2 dagar och vid efterfrågestruktur 5 vid en ledtid på 5 dagar som servicenivån hamnar under felmarginalen. Avvikelsen är emellertid endast enstaka tiondels procentenhet. I 3 kombinationer av efterfrågestruktur och ledtid hamnar den erhållna servicenivån enstaka tiondels procentenhet över felmarginalen. Med tanke på att dessa avvikelser är mycket små jämfört med motsvarande för de normalfördelningsbaserade materialstyrningsmodellerna kan modellen med gammafördelning betraktas som jämförelsevis klart bättre och som en modell som i huvudsak håller sig inom det uppsatta målet för acceptabel felmarginal i förhållande till önskad servicenivå.

Periodiskt beställningspunktssystem baserat på empirisk fördelning med hänsyn till överdrag: Med en lagerstyrningsmodell baserad på empirisk fördelning och med hänsyn till överdrag blir möjligheterna ytterligare större att uppnå de servicenivåer man önskar och dimensionerar sitt materialstyrningssystem för. Av tabellerna framgår att den ovan acceptabla felmarginalen inte underskrids i något fall och att den endast överskrids med en tiondels procentenhet i två efterfrågestrukturfall vid en ledtid på 40 dagar. Avvikelserna i förhållande till den önskade servicenivån är också klart mindre än för gammafördelningen.

Hur effektiv en materialstyrningsmetod är avgörs i huvudsak av dess förmåga att medföra att de servicenivåer som erhålls så nära som möjligt motsvarar de som önskas och som materialstyrningssystemet dimensioneras för. Det är emellertid också av betydelse i vilken utsträckning erhållna servicenivåer varierar över tiden. Varierande servicenivåer ger dels upphov till onödig extra kapitalbindning, dels till att man inte kan säkerställa en jämn leveransförmåga till kund. För att studera hur fyra av de olika materialstyrningsmodellerna fungerar i detta avseende har även servicenivåernas standardavvikelser beräknats. Dessa standardavvikelser utgör uttryck för hur mycket erhållna servicenivåer varierar månad för månad under de 25 simulerade åren. Erhållna servicenivåer har beräknats som andelen av den totala efterfrågan under passerat helt år som kunnat levereras direkt från lager. Resultaten för ledtiderna 2, 10 och 40 dagar redovisas i tabell 22, 23 respektive 24.

Tabell 22 Standardavvikelser för servicenivåer för den teoretiskt genererade efterfrågan vid en ledtid på 2 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Normalförd. Periodisk</i>	<i>Normalförd. Överdrag</i>	<i>Gammaförd. Överdrag</i>	<i>Empir. förd. Överdrag</i>
1	0,7	0,6	0,6	0,7
2	1,0	0,9	0,9	0,9
3	2,2	1,7	1,4	1,4
4	6,2	4,1	2,4	2,6
5	13,4	9,9	7,1	5,6
6	2,2	1,6	1,4	1,5
7	12,3	8,1	6,1	5,0
8	2,1	1,7	1,2	1,4
9	11,9	10,0	6,4	4,6

Tabell 23 Standardavvikelser för servicenivåer för den teoretiskt genererade efterfrågan vid en ledtid på 10 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Normalförd. Periodisk</i>	<i>Normalförd. Överdrag</i>	<i>Gammaförd. Överdrag</i>	<i>Empir. förd. Överdrag</i>
1	1,0	1,0	1,0	1,0
2	1,3	1,2	1,2	1,2
3	2,8	2,3	1,9	2,0
4	6,4	4,6	2,2	3,2
5	13,3	9,4	5,9	5,2
6	2,7	2,3	1,8	3,1
7	13,2	8,5	5,0	5,3
8	2,7	2,5	1,8	2,1
9	12,6	9,9	5,6	4,6

Tabell 24 Standardavvikelser för servicenivåer för den teoretiskt genererade efterfrågan vid en ledtid på 40 dagar

<i>Efterfrågestruktur</i>	<i>Normalförd. Periodisk</i>	<i>Normalförd. Överdrag</i>	<i>Gammaförd. Överdrag</i>	<i>Empir. förd. Överdrag</i>
1	1,9	1,8	1,8	1,7
2	2,6	2,4	2,3	2,3
3	5,0	4,5	3,7	3,7
4	7,9	6,5	3,0	4,2
5	11,7	8,8	1,9	3,4
6	4,6	3,9	3,3	3,5
7	11,2	7,4	1,4	3,0
8	4,6	4,3	3,5	3,8
9	12,0	9,1	1,6	3,2

Av tabellerna framgår klart att det inte föreligger några nämnvärda skillnader i standardavvikelser när efterfrågan är förhållandevis jämn, dvs för efterfrågestrukturerna 1 och 2. För efterfrågestrukturer som representerar något större efterfrågevariationer, dvs 3, 4, 6 och 8 blir standardavvikelseerna klart lägre för de materialstyrningsmodeller som tar hänsyn till överdrag, speciellt de som baseras på gammafördelning och empirisk fördelning. Vid än större efterfrågevariationer, dvs för efterfrågestrukturerna 5, 7 och 9 blev skillnaderna än större. För den längsta ledtiden på 40 dagar reduceras exempelvis standardavvikelseerna till mindre än en tredjedel genom att använda de materialstyrningsmodeller som baseras på gammafördelning och empirisk fördelning och med hänsyn tagen till överdrag. Skillnaderna i standardavvikelser är signifikanta i förhållande till de som erhålls med det periodiska beställningspunktssystemet utan hänsyn till överdrag för samtliga efterfrågestrukturer och ledtider utom för ledtidsstruktur 1, dvs den med allra jämnast efterfrågan. Av tabellerna framgår också att skillnaderna i standardavvikelser mellan det periodiska beställningspunktssystemet utan hänsyn till överdrag å den ena sidan och de materialstyrningsmodeller som tar hänsyn till överdrag blir större ju längre ledtiden är.

Ett sätt att minska variationerna i erhållna servicenivåer är att utjämna nyberäknade beställningspunkter mot de som gällde månaden före på det sätt som framgick av kapitel 7. För att studera vilka effekter en sådan utjämning vid beställningspunktsberäkning får på variationer i erhållna servicenivåer har simuleringar genomförts även på utjämnade beställningspunkter på samma sätt som ovan. Simuleringarna har begränsats till att omfatta periodiskt beställningspunktssystem baserat på normalfördelning, gammafördelning respektive empirisk fördelning, i samtliga fall med hänsyn till överdrag, och med en ledtid på 10 dagar. Orderkvantiteten har satts till motsvarande 20 dagars efterfrågan. Resultaten som omfattar både medelvärden och standardavvikelser för erhållna servicenivåer redovisas i tabell 25 och 26.

Tabell 25 Jämförelser av erhållna medelservicenivåer från beställningspunktpunkter beräknade med respektive utan utjämning

Efterfrågestruktur	Normalfördelning		Gammafördelning		Empirisk fördelning	
	Utan utj	Med utj	Utan utj	Med utj	Utan utj	Med utj
1	97,9	98,0	98,0	98,0	97,9	98,0
2	97,9	98,0	98,1	98,2	98,0	98,1
3	97,4	97,7	98,4	98,7	98,0	98,3
4	96,2	97,0	99,1	99,3	98,2	98,6
5	94,0	95,2	97,6	98,1	98,0	98,5
6	97,6	97,6	98,4	98,4	97,9	98,0
7	95,0	95,7	98,1	98,6	98,0	98,6
8	97,4	97,7	98,5	98,7	98,0	98,3
9	93,4	94,7	97,6	98,3	98,4	99,2

Av tabell 25 framgår att utjämning vid beräkning av beställningspunkter praktiskt taget inte alls förändrar erhållen servicenivå när efterfrågan är förhållandevis jämn som den är för efterfrågestruktur 1 och 2. För efterfrågestrukturerna 3, 4, 6 och 8 med något större efterfrågevariationer är skillnaderna noterbara i form av att de utjämnade beställningspunkterna ger något högre servicenivåer. Skillnaderna är emellertid av förhållandevis marginellt intresse från praktisk användarsynpunkt. Vid stora efterfrågevariationer, som fallet är för efterfrågestrukturerna 5, 7 och 9, är däremot skillnaderna av sådan storleksordning att metoden med att använda utjämning vid beställningspunktsberäkning kan vara ett intressant alternativ för att uppnå erhållna servicenivåer som ligger närmre de önskade när normalfördelning används i beställningspunktssystemet. Vid gammafördelning leder användning av utjämning vid beställningspunktsberäkning snarast till att erhållna servicenivåer blir högre än önskat. Med endast två undantag håller de emellertid sig inom den tillåtna felmarginalen på en procent över önskad servicenivå som diskuterades ovan.

Tabell 26 Jämförelser av erhållna standardavvikelser för servicenivåer från beställningspunktpunkter beräknade med respektive utan utjämning

Efterfrågestruktur	Normalfördelning		Gammafördelning		Empirisk fördelning	
	Utan utj	Med utj	Utan utj	Med utj	Utan utj	Med utj
1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
3	2,3	2,3	1,9	1,7	2,0	2,0
4	4,6	4,2	2,2	1,9	3,2	2,9
5	9,4	8,0	5,8	4,7	5,2	4,1
6	2,3	2,4	1,8	1,9	2,1	2,1
7	8,5	7,4	5,0	4,1	5,3	4,2
8	2,5	2,2	1,8	1,7	2,1	1,9
9	9,9	8,3	5,6	4,6	4,6	3,2

Motsvarande resultat med avseende på standardavvikelser och därmed beställningspunktsutjämnings påverkan på variationer i servicenivåer framgår av tabell 26. Som framgår av tabellen påverkar utjämning vid beställningspunktsberäkning praktiskt taget inte alls servicenivåernas variationer i form av standardavvikelser när efterfrågan är

jämn, dvs i första hand efterfrågestrukturerna 1, 2, 3, 4, 6 och 8. Däremot blir minskningen i standardavvikelse av en mer intressant storleksordning för övriga efterfrågestrukturer. För dessa efterfrågestrukturer är de också signifikanta på 0,5%-nivån. Detta gäller samtliga behandlade materialstyrningsmodeller. Resultaten är logiska förväntade.

8.2 Analys och resultat från den efterfrågan som erhållits från fallföretagen

Motsvarande resultat för erhållna servicenivåer i procent i medeltal från den efterfrågehistorik som erhållits från fallföretagen redovisas i tabell 27. Även i det här fallet är resultaten baserade på dagliga uttag och inleveranser under 25 år och vid användning av de fem lagerstyrningsmodeller som presenterades ovan. Servicenivåerna i tabellen redovisas per rörlighetsklass för vart och ett av företagen.

De förhållanden som kunde identifieras för den teoretiskt genererade efterfrågan gäller i stor utsträckning även för fallföretagens efterfrågan. Av tabellen framgår att de materialstyrningsmodeller för vilka hänsyn tas till överdrag samtliga ger en högre erhållen servicenivå än de utan sådan. I samtliga fall är dessutom skillnaderna signifikanta på 0,5%-nivån i förhållande till det periodiska beställningspunktssystemet utan hänsyn till överdrag utom för företag A och rörlighetsklass 1 baserat på normalfördelning och gammafördelning. För de olika materialstyrningsmodellerna kan då följande slutsatser dras om man enligt ovan betraktar erhållna servicenivåer på +/- en procentenhet jämfört med den servicenivå materialstyrningssystemet dimensionerats som en acceptabel felmarginal, dvs erhållna servicenivåer på från 97 till 99 % är fullt godtagbara.

Tabell 27 Erhållna medelservicenivåer i procent för den efterfrågan som erhållits från fallföretagen

<i>Företag / Rörl. klass</i>	<i>Normal- fördelning Kontinuerlig</i>	<i>Normal- fördelning Periodisk</i>	<i>Normal- fördelning Överdrag</i>	<i>Gamma- fördelning Överdrag</i>	<i>Empirisk fördelning Överdrag</i>
Företag A					
1	95,7	96,1	97,4	97,9	97,7
2	95,9	96,1	97,1	98,1	97,8
3	93,9	94,2	95,6	97,8	97,2
4	93,9	94,1	95,8	99,0	98,3
Företag B					
1	92,1	95,8	97,2	98,3	98,0
2	94,0	94,7	96,9	98,3	97,9
3	94,0	93,5	96,4	98,0	97,5
4	94,2	92,4	96,6	97,7	98,2
Företag C1					
1	95,9	96,6	97,6	98,3	98,0
2	94,2	94,8	96,8	98,6	97,8
3	85,0	85,9	92,0	94,6	95,9
4	82,9	83,9	91,6	93,7	96,4
Företag C2					
1	95,6	96,9	97,6	98,9	98,3
2	93,9	95,1	96,9	98,9	98,2
3	90,0	91,1	94,5	97,3	97,5
4	83,5	84,7	91,6	94,2	96,7

Företag D					
1	97,3	97,5	97,9	98,2	97,9
2	96,9	97,0	97,6	98,2	97,7
3	95,7	95,8	97,0	98,3	97,9
4	94,6	94,8	96,5	98,5	97,9

Beställningspunktssystem baserat på normalfördelning utan hänsyn till överdrag:

För samtliga företag och rörlighetsklasser utom för företag D rörlighetsklass 1, dvs de med jämnast efterfrågan hos företag D erhålls oacceptabelt låga servicenivåer.

Periodiskt beställningspunktssystem baserat på normalfördelning utan hänsyn till överdrag: För ett periodiskt beställningspunktssystem baserat på normalfördelning och utan hänsyn till överdrag är det endast för företag D och artiklarna tillhörande de båda rörlighetsklasser med jämnast efterfrågan som man får servicenivåer inom acceptabla felmarginaler. Detta är förväntat eftersom enligt tabell 5 artiklar tillhörande dessa rörlighetsklasser i stor utsträckning uppfyller kriteriet för att normalfördelning skall vara tillämpbar.

Periodiskt beställningspunktssystem baserat på normalfördelning med hänsyn till överdrag: Om det periodiska beställningspunktssystemet kompletteras med hänsyn till överdrag blir det mer användbart. Erhållna servicenivåer ligger då i huvudsak ovanför toleransintervallets undre gräns för rörlighetsklass 1 och 2 i samtliga företag. För övriga rörlighetsklasser är materialstyrningsmodellen inte lämplig att använda med den bedömningsnorm som tillämpas här.

Periodiskt beställningspunktssystem baserat på gammafördelning med hänsyn till överdrag: Används gammafördelning för det periodbaserade beställningspunktssystemet och hänsyn även tas till överdrag fås en betydligt bättre överensstämmelse mellan önskad och erhållen servicenivå. Det är endast för rörlighetsklass 3 och 4 tillhörande företag C1 samt rörlighetsklass 4 tillhörande företag C2 som servicenivån hamnar under felmarginalen. I båda fallen är det fråga om artiklar med mycket stor variation i efterfrågan och med många inslag av extrema efterfrågevärden. Med tanke på de erhållna resultaten jämfört med motsvarande för de normalfördelningsbaserade materialstyrningsmodellerna kan modellen med gammafördelning betraktas som klart bättre och som en modell som i huvudsak håller sig inom det uppsatta målet för acceptabel felmarginal i förhållande till önskad servicenivå.

Periodiskt beställningspunktssystem baserat på empirisk fördelning med hänsyn till överdrag: Med en lagerstyrningsmodell baserad på empirisk fördelning och med hänsyn till överdrag är resultaten ungefär de samma som de som erhöles för gammafördelning med överdrag. Medelvärdena för erhållna servicenivåerna ligger emellertid ytterligare något närmre den önskade servicenivån och avvikelserna från acceptabel felmarginal blir klar mindre för de tre rörlighetsklasserna C1-3, C1-4 och C2-4 jämfört med gammafördelningsmodellen.

Även resultaten med avseende variationer i erhållna servicenivåer är likartade de som erhöles för den teoretiskt genererade efterfrågan, dvs de modeller som tar hänsyn till överdrag ger lägre standardavvikelser för erhållna servicenivåer. Med enstaka undantag är skillnaderna också signifikanta på 0,5%-nivån. För företagen med stor andel artiklar

som uppfyller normalfördelningskriterierna är skillnaderna små och genomgående inte signifikanta. För övriga tre medför normalfördelningen klart större variationer i erhållna servicenivåer. Skillnaderna ligger i storleksordningen en procentenhet för de lägsta rörlighetsklasserna, dvs de med jämnast efterfrågan, och storleksordningen fem procentenheter för den högsta rörlighetsklasserna både vid användning av den gammafördelningsbaserade modellen och den modell som baseras på empirisk fördelning. Skillnaderna är något mindre för den normalfördelningsbaserade modellen med hänsyn tagen till överdrag.

De metoder som bygger på att ta hänsyn till överdrag ger sålunda mindre variationer i erhållna servicenivåer. Som påpekades ovan är utjämning vid beställningspunktsberäkning ett ytterligare sätt att minska dessa variationerna. För att studera vilka effekter en sådan utjämning vid beställningspunktsberäkning får på erhållna servicenivåer har simuleringar genomförts även på utjämnade beställningspunkter för den från fallföretagen erhållna efterfrågan. Resultaten redovisas i tabell 28 och 29.

Tabell 28 Jämförelser av erhållna servicenivåer från beställningspunktpunkter beräknade med respektive utan utjämning baserat på efterfrågehistorik från fallföretagen

Företag / Rörl.klass	Normalfördelning		Gamma fördelning		Empirisk fördelning	
	Utan Utj	Med utj	Utan Utj	Med utj	Utan Utj	Med utj
Företag A						
1	97,4	97,7	97,9	98,2	97,7	98,1
2	97,1	97,6	98,1	98,5	97,8	98,2
3	95,6	96,6	97,8	98,3	97,2	98,0
4	95,8	96,9	99,0	99,1	98,3	99,0
Företag B						
1	97,2	97,4	98,3	98,5	98,0	98,1
2	96,9	97,2	98,3	98,7	97,9	98,1
3	96,4	96,9	98,0	98,6	97,5	98,0
4	96,6	96,7	97,7	98,9	98,2	98,5
Företag C1						
1	97,6	97,7	98,3	98,8	98,0	98,1
2	96,8	97,0	98,6	98,9	97,8	98,2
3	92,0	93,0	94,6	94,6	95,9	97,0
4	91,6	92,3	93,7	94,2	96,4	97,1
Företag C2						
1	97,6	97,8	98,9	99,0	98,3	98,4
2	96,9	97,1	98,9	99,1	98,2	98,5
3	94,5	95,4	97,3	98,5	97,5	98,1
4	91,6	92,4	94,2	97,1	96,7	97,7
Företag D						
1	97,9	98,0	98,2	98,4	97,9	98,0
2	97,6	97,9	98,2	98,4	97,7	98,1
3	97,0	97,5	98,3	98,5	97,9	98,2
4	96,5	97,1	98,5	98,7	97,9	98,3

Av tabell 28 framgår att utjämning vid beräkning av beställningspunkter ger en mycket marginell ökning av erhållen servicenivå för de lägsta rörlighetsklasserna, dvs de för

vilka efterfrågan är förhållandevis jämn. För de högre rörlighetsklasserna blir ökningen större. Ökningarna är emellertid av förhållandevis marginellt intresse från praktisk användarsynpunkt utom för de rörlighetsklasser där erhållen servicenivå klart underskrider den undre toleransgränsen för acceptabelt erhållen servicenivå. Vid gammafördelning leder användning av utjämning vid beställningspunktsberäkning snarast till att erhållna servicenivåer blir högre än önskat. Så är inte i samma utsträckning fallet vid empirisk fördelning. Det kan noteras att genom att tillämpa utjämning vid beställningspunktsberäkning ligger samtliga erhållna servicenivåer inom den acceptabla felmarginalen när modellen baserad på empirisk fördelning används.

Tabell 29 Skillnader i erhållna standardavvikelser i procentenheter för servicenivåer från beställningspunktpunkter beräknade med respektive utan utjämning för den från fallföretagen erhållna efterfrågehistoriken

<i>Företag / Rörl.klass</i>	<i>Normal fördelning</i>	<i>Gamma fördelning</i>	<i>Empirisk Fördelning</i>
Företag A			
1	-0,1	-0,1	-0,1
2	-0,3	-0,3	-0,4
3	-1,1	-0,9	-1,0
4	-1,8	-1,0	-1,2
Företag B			
1	-0,1	-0,1	0,0
2	-0,1	-0,1	-0,2
3	-0,3	-0,2	-0,6
4	-0,2	-0,1	-0,5
Företag C1			
1	0,0	-0,1	0,0
2	-0,1	-0,2	-0,4
3	-0,8	-1,0	-1,5
4	-1,2	-1,4	-1,3
Företag C2			
1	0,0	0,0	-0,1
2	-0,1	-0,2	-0,2
3	-0,5	-0,5	-0,6
4	-1,2	-1,5	-1,6
Företag D			
1	0,0	0,0	-0,1
2	-0,3	-0,2	-0,3
3	-0,3	-0,1	-0,2
4	-1,1	-0,5	-0,9

Motsvarande resultat med avseende på standardavvikelser och därmed beställningspunktsutjämnings påverkan på variationer i servicenivåer framgår av tabell 29. Tabellen visar skillnader procentenheter i erhållna medelstandardavvikelser per företag och rörlighetsklass. Som framgår av tabellen påverkar utjämning vid beställningspunktsberäkning praktiskt taget inte alls servicenivåernas variationer i form av standardavvikelser när efterfrågan är förhållandevis jämn, dvs för de lägsta rörlighetsklasserna. Det är

principiellt samma resultat som erhöles för den teoretiskt genererade efterfrågan. Minskningen i standardavvikelser blir av en mer intressant storleksordning för de högsta rörlighetsklasserna. För företag A, B och D är minskningen emellertid inte signifikant på 0,5%-nivån.

9 Sammanfattning och slutsatser

Uttag från lager representerar i allmänhet kvantiteter som är större än en styck åt gången medan vanligt använda materialstyrningsmodeller bygger antaganden om enstycksuttag. Att uttagen inte är en styck åt gången leder till så kallade överdrag, dvs att lagersaldot underskrider beställningspunkten vid de tillfällen beställningar för att fylla på lagret måste läggas ut. Beställningspunktskvantiteten riskerar därmed att bli otillräcklig för att täcka den efterfrågan som inträffar under ledtiden. Konsekvensen blir att den servicenivå som man erhåller i verkligheten blir lägre än den man dimensionerat materialstyrningssystemet för.

För att kunna få den servicenivå som man önskar måste man vid dimensionering av materialstyrningssystemet utgå från en efterfrågefördelning som är rimligt representativ för den verkliga efterfrågan och dess variation över tiden. I de materialstyrningsmodeller som används i företag utgår man nästan uteslutande från ett antagande om att efterfrågan är normalfördelad. I några fall förekommer det också att Poissonfördelningar används, speciellt vid materialstyrning av reservdelar. Det är emellertid inte särskilt självklart att verkliga efterfrågefördelningar på ett acceptabelt sätt motsvarar vare sig normalfördelning eller Poissonfördelning. Speciellt kan detta ifrågasättas för normalfördelningen när det är fråga om lågrörliga artiklar med ojämna efterfrågemönster och för Poisson fördelningen om uttagen från lager inte rör sig om storleksordningen enstaka styck åt gången. Det är därför av intresse att studera och utvärdera i vilken utsträckning andra fördelningar på ett bättre sätt kan representera verklighetens efterfrågemönster.

I det projekt som redovisas i den här rapporten har modeller för att ta hänsyn till överdrag utvecklats och konsekvenser av att använda dessa modeller analyserats och utvärderats. Tillvägagångssätt för att kunna använda materialstyrningsmodeller som bygger på gammafördelad och empiriskt fördelad efterfrågan har också utvecklats, analyserats och utvärderats i förhållande till normalfördelningsmodeller. Resultat och slutsatser från dessa analyser summeras nedan.

De överdrag som erhålls med utvecklade teoretiska modeller överensstämmer mycket väl med de överkliga värden som erhållits med hjälp av simulering, både när de tillämpas på den teoretiskt genererade efterfrågan och på den efterfrågehistorik som erhållits från fyra fallföretag. Överensstämmelsen mellan teoretiskt beräknade standardavvikelser för överdragsvariationer och överkligt erhållna från simulering är något sämre men tillfredsställande med tanke på dess begränsade betydelse för storleken på beräknade beställningspunkter.

Genomförda beräkningar visar att överdrag har en betydande storlek i förhållande till motsvarande beställningspunkter vid korta ledtider och varierande efterfrågan. Den allmänna slutsats man kan dra baserat på de erhållna resultaten är att det endast är vid efterfrågevariationer karakteriserade av variationskoefficienter mindre än storleksordningen 0,35 under ledtid som man kan tillåta sig att avstå från att ta hänsyn till överdrag om man vill uppnå servicenivåer som är i närheten av den önskade och den som materi-

alstyrningssystemet är dimensionerat för. Vid mycket varierande efterfrågan och korta ledtider är överdragen i samma storleksordning som eller större än motsvarande beställningspunkter utan hänsyn till överdrag.

Beställningspunkter beräknade med materialstyrningsmodeller som tar hänsyn till överdrag blir klart högre än med modeller utan sådana hänsyn. Skillnaderna blir större ju mer efterfrågan varierar och ju kortare ledtiderna är. Beräkningarna visar också att beställningspunkterna varierar avsevärt från månad till månad. Dessa variationer leder i sin tur till att erhållna servicenivåer varierar. För att minska inslaget av variationer har en metodik utvecklats för att utjämna beräknade beställningspunkter. Av genomförda analyser framgår att skillnaderna i medelvärden mellan beställningspunkter med och utan utjämning i huvudsak är försumbara. Däremot är skillnaderna mellan hur mycket de varierar uttryckta som standardavvikelser inte försumbara. För merparten av de efterfrågestrukturer som studerats blir standardavvikelseerna utan utjämning mellan 30 och 40 % större än motsvarande utjämnade beställningspunkter. För övriga fall var de ytterligare större. Den slutsats man kan dra av resultaten är därför att variationsutjämning vid beräkning av beställningspunkter kan vara ett effektivt hjälpmedel för att säkerställa en jämnare servicenivå.

Materialstyrningsmodeller som tar hänsyn till överdrag ger genomgående en högre erhållen servicenivå än de utan sådana hänsyn. Skillnaderna är signifikanta. Om man använder bedömningsnormen att erhållna servicenivåer på +/- en procentenhet jämfört med den servicenivå materialstyrningssystemet dimensionerats för är en acceptabel felmarginal, blir slutsatsen av de resultat som erhållits vid simuleringarna att materialstyrningsmodeller baserade på normalfördelning utan hänsyn tagen till överdrag endast är rimliga att använda vid mycket jämn efterfrågan, dvs för variationskoefficienter mindre än 0,5. Tas hänsyn till överdrag blir modellen användbar även för efterfrågefall med variationskoefficienter under ledtid på storleksordningen 1 eller mindre.

Om i stället materialstyrningsmodellen baseras på gammafördelning och kan ta hänsyn till överdrag kommer erhållna servicenivåer att i huvudsak ligga inom en felmarginal på +/- en procentenhet oavsett hur mycket efterfrågan varierar. En slutsats är följaktligen att gammafördelningsbaserade lagerstyrningsmodeller kan betraktas som jämförelsevis klart bättre än normalfördelningsbaserade vad gäller att uppnå acceptabla felmarginaler för erhållna servicenivåer. Ytterligare mindre felmarginaler erhålls med hjälp av empirisk fördelning och hänsyn tagen till överdrag. Slutsatserna gäller både för den teoretiskt genererade efterfrågan och för den efterfrågan som erhållits från de fyra fallföretagen.

Av resultaten framgår också att det inte föreligger några nämnvärda skillnader i hur mycket servicenivåerna varierar mellan de olika testade materialstyrningsmodellerna vid jämn efterfrågan. Ju ojämnare efterfrågan är, desto mindre variationer får man om modellerna baseras på gammafördelning eller empirisk fördelning, i båda fallen med hänsyn till överdrag. Även i detta avseende är slutsatsen att materialstyrningsmodeller baserade på gammafördelning eller empirisk fördelning är att föredra framför övriga testade modeller. Användning av beställningspunktsutjämning påverkar nästan inte alls variationerna i erhållna servicenivåer om hänsyn tas till överdrag och oavsett vilken fördelning som används när efterfrågan är jämn. Däremot blir minskning i servicenivåvariationer av mer intressant storleksordning vid fall med mer varierande efterfrågan.

Referenser

- Baganha, M. i Pyke, D. i Ferrer, G. (1996) The undershoot of the reorder point: Test of an approximation, *International Journal of Production Economics*, Vol. 45, sid 311-320.
- Banerjee, R. i Burton, J. i Banerjee, A. (2003) A simulation study of lateral shipments in single supplier multiple buyers supply chain networks, *International Journal of Production Economics*, Vol. 81-82, sid 103-114.
- Bookbinder, J. i Lordahl, A. (1989) Estimation of inventory re-order levels using the bootstrap statistical procedure, *IIE Transactions*, December, sid 302 i 312.
- Brown, R. (1963) Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series, Prentice-Hall.
- Burgin, R. (1975) The gamma distribution and inventory control, *Operational Research Quarterly*, Vol. 26 No. 3, sid 507-525.
- Burgin, T. i Norman, J. (1976) A table for determining the probability of a stock out and potential lost sales for a gamma distributed demand, *Operational Research Quarterly*, Vol. 27 No. 3, sid 621-631.
- Delurgio, S. - Bhamed, C. (1991) Integrating forecasts and inventory management of low-volume demands, *APICS's Conference Proceedings*, sid 589 i 593.
- Fagan, M. (1984) Determination of safety stock: A practical approach for service industries, *APICS conference proceedings*, sid 84 i 88.
- Fortuin, L. (1980) Five popular probability density functions: A comparison in the field of stock-control models, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 31 No. 10, sid 937 i 942.
- Friend, J. (1960) Stock control with random opportunities for replenishment, *Operations Research Quarterly*, Sid 130-136.
- Ganeshan, R. i Boone, T. i Stenger, A. (2001) The impact of inventory and flow planning parameters on supply chain performance: an explorative study, *International Journal of Production Economics*, Vol. 71, sid 111-118.
- Hax, A. i Candea, D. (1984) Production and inventory management, Prentice-Hall.
- Heyman, D. i Sobel, M. (1982) Stochastic models in operation research, McGraw-Hill.
- Hill, R. (1988) Stock control and the undershoot of the reorder level, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 39 No 2, sid 173-181.
- Hong-Minh, S. i Disney, S. i Naim, M. (2000) The dynamics of emergency shipment supply chains, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 30 No. 9, sid 788-816.

Huq, F. (2006) Simulation study of a two-level warehouse inventory replenishment system, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 36 No. 1.

Janssen, F. i Heuts, R. i Kok, T. (1998) On the (R,s,Q) inventory model when demand is modeled as a compound Bernoulli process, *European Journal of Operational Research*, No. 104, sid 423-436.

Jonsson, P. i Mattsson, S-A. (2005) Materialplaneringsmetoder i svensk industri - Användning och användningssätt, Logistikföreningen PLAN.

Johansen, S. i Hill, R. (2000) The (r,Q) control of a periodic-review inventory system with continuous demand and lost sales, *International Journal of Production Economics*, Vol. 68, sid 279-286.

Keaton, M. (1995) Using the gamma distribution to model demand when lead times are random, *Journal of Business Logistics*, Vol. 16 No. 1.

Lau, H-S. (1989) Toward an inventory control system under non-normal demand and lead-time uncertainty, *Journal of Business Logistics*, Vol. 10 No. 1, sid 88 i 103.

Lewis, C. (1975) Demand analysis and inventory control, Saxon House.

Mattsson, S-A. (2002) En jämförelse mellan olika servicenivåbegrepp i beställningspunktssystem, Intern forskningsrapport, Institutionen för Teknisk ekonomi och logistik, Lunds Universitet.

Mattsson, S-A. (2003) Efterfrågefördelning vid bestämning av beställningspunkter och säkerhetslager, Intern forskningsrapport, Institutionen för Teknisk ekonomi och logistik, Lunds Universitet.

Mattsson, S-A. (2007) Beräkning av standardavvikelse för dimensionering av säkerhetslager, Intern forskningsrapport, Institutionen för Teknisk ekonomi och logistik, Lunds Universitet.

Moors, J. i Stribosch, L. (1998) Exact fill rates for (R,s,S) inventory control with gamma distributed demand pattern, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, sid 1268-1274.

Naddor, E. (1978) Sensitivity to distributions in inventory systems, *Management Science*. Vol. 24 No. 16, sid 1769-1772.

Olhager, J. i Persson, F. (2006) Simulating production and inventory control systems: a learning approach to operational excellence, *Production Planning & Control*, Vol. 17 No. 2.

Razi, M. i Tarn, M. (2003) An applied model for improving inventory management in ERP systems, *Logistics Information Management*, Vol. 16 No. 2.

- Schönsleben, P. (2004) Integral logistics management, St Lucie Press.
- Silver, E. (1970) Some ideas related to the inventory control of items having erratic demand patterns, *CORS Journal*, Vol. 8 No. 2, sid 87-100.
- Silver, E. i Peterson, R. (1985) Decision systems for inventory management and production planning, John Wiley & Sons.
- Silver, E. i Pyke, D. i Peterson, R. (1998) Inventory management and production planning and scheduling, John Wiley & Sons.
- Smart, C. i Willemain, T. (2000) A new way to forecast intermittent demand, *The performance Advantage*, Juni, sid 64 i 68.
- Smart, C. (2002) Accurate intermittent demand/inventory forecasting: New technologies and dramatic results, *APICS International Conference Proceedings*.
- Småros, J. i Lehtonen, J. i Appelqvist, P. i Holmström, J. (2003) The impact of increasing demand visibility on production and inventory control efficiency. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 33 No. 4, sid 336-354.
- Strijbosch, L. i Heuts, R. i van der Schoot, E. (2000) A combined forecast i inventory control procedure for spare parts, *Journal of the Operational Research Society*, sid 1184-1192.
- Strijbosch, L. i Moors, J. (2006) Modified normal demand distributions in (R,S)-inventory control. *European Journal of Operational Research*, 172, sid 201-212.
- Tijms, H. i Groenevelt, H. (1984) Simple approximations for the reorder point in periodic and continuous review (s,S) inventory systems with service level constraints, *European Journal of Operational Research*, sid 175-192.
- Tyworth, J. i Guo, Y. i Ganeshan, R. (1996) Inventory control under Gamma demand and random lead time, *Journal of Business Logistics*, Vol. 17 No.1, sid 291-304.
- Ward, J. (1978) Determining reorder points when demand is lumpy, *Management Science*, Vol. 24 No. 6.
- Wilcox, J. (1970) How to forecast lumpy items, *Production and Inventory Management*, 1st Qtr, sid 51 i 54 .
- Wilkinson, S. (1996) Service level and safety stock based on probability, *Control*, April, sid 23 i 25.
- Willemain, T. i Smart, C. i Schwarz, H. (2004) A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories, *International Journal of Forecasting*, Vol. 20, Sid 375-387.

Yeh, Q. (1997) A practical implementation of gamma distribution to the reordering decision of an inventory control problem, *Production and Inventory Management Journal*, 1st Qtr, sid 51 i 57.

Zotteri, G. (2000) The impact of distributions of uncertain lumpy demand on inventories, *Production Planning & Control*, Jan i Feb, sid 32 i 43.