

TBA4853 EKSPERTER I TEAM



Punktlig og effektiv jernbane

Kapasitetsutnyttelse på sterkt belastede strekninger

VÅR 2012

Gruppe 4:

Anders Lund Eriksrud

Frida Haveråen

Emma Johansson

Helene Oma

Matias Wilhelmsen

Sondre Stette

Veileder:

Mads Veiseth

Forord

Prosjektet er utført av en tverrfaglig gruppe bestående av sivilingeniørstudenter ved NTNU. Oppgaven er utført i 8. semester som prosjekt i faget TBA4852 Eksperter i team - Punktlig og effektiv jernbane.

Gruppen vil rette en spesiell takk til Gaute Borgerud og Tor Nicolaisen ved Jernbaneverket, Anne Christine Torp Handstanger ved Norconsult og Sven Jøran Schader i NSB for god hjelp til prosjektet.

Forsidebildet er hentet fra Aftenpostens nettutgave 28.03.12¹

Rapporten krever at leseren har grunnleggende kunnskap om jernbane og økonomi.

Følgende dataverktøy har vært benyttet i arbeidet med oppgaven:

- L^AT_EX 2_ε ved hjelp av MiKTeX, TeXnicCenter og TeXstudio
- Microsoft Paint, Office Word, Excel, PowerPoint, Visio og Project
- MATLAB

Trondheim, 25. April 2012

Anders Lund Eriksrud

Frida Haveråen

Emma Matilda Johansson

Helene Oma

Sondre Stette

Matias Wilhelmsen

¹<http://www.aftenposten.no/nyheter/iriks/article4247864.ece#.T46FDauO3Fk>.

Sammendrag

Rapporten analyserer ulike måter å øke kapasitetsutnyttelsen på en sterkt belastet jernbanelinje. Oslo-Ski er brukt som et utgangspunkt for analysen, og kapasitetsutnyttelsen på denne strekningen i dag er analysert. Deretter presenteres tradisjonelle metoder og nye forslag for økning av kapasitetsutnyttelse. Forslagene er dynamisk ruteplanlegging, økt fokus på vedlikehold og tidsdifferensierte priser. Dynamisk ruteplanlegging kan øke mengden godstransport på en belastet strekning. Økt fokus på vedlikehold kan bedre oppetiden og punktligheten til jernbanen. Resultatet fra analysen av tidsdifferensierte priser gir en økning i antall reisende på omtrent én prosent ved en økning av billettprisene på 92 % i rushtid og en prisreduksjon på 38 % utenom rush.

Variabler

| | |
|-----------------|---|
| a | Andel reiser i et prissegment |
| c_r | Antall reisende dersom prisen er null i rush-tid |
| c_u | Antall reisende dersom prisen er null utenom rush |
| f_{min} | Minste følgetid |
| f_p | Produktfaktor |
| f_s | Særfaktor |
| f_r | Regionsfaktor |
| k_f | Marginalkostnad ved forsinkelse når t øker |
| k_{tog} | Daglig marginalkostnad av å kjøre ett ekstra tog |
| $k_{passasjer}$ | Marginalkostnad uttrykt ved passasjerer |
| n | Økonomisk levetid |
| p | Pris |
| q | Antall reiser |
| r | Kalkylerente |
| s | Strekning i km |
| t | Antall tog på strekningen |
| v_t | Antall avganger for tog nummer t |
| A | Annuitet |
| C | Kapasitet dobbeltsporet strekning |
| E | Energikostnad |
| G | Klargjøringskostnad |
| I | Totalkostnad for investering |
| K_f | Forsinkelseskostnad |
| K_k | Kjørelengdekostnad per reise |
| K_m | Materiellkostnad |
| K_t | Tjenestetidkostnad |
| S | Strekningskategori |
| T | Tid |
| V | Vedlikeholdskostnader |
| Q | Totalt antall passasjerer |
| ϵ | Priselastisitet |

Figurer

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Antall passasjerer og passasjertog inn til Oslo (venstre) og ut av Oslo (høyre). . . | 5 |
| 3.2 | Forsinkelsesminutter per tog og antall samtidige tog på strekningen. | 6 |
| 4.1 | Kapasitetsutnyttelse ved henholdsvis lik hastighet (venstre) og ulik hastighet (høyre). | 8 |
| 4.2 | Inndeling av vedlikeholdstyper | 11 |
| 4.3 | Jernbanetrasés komponenter [16] | 12 |
| 4.4 | Etterspørselsgrafer for henholdsvis rush og utenom rush. | 15 |
| 4.5 | Antall passasjerer som blir fraktet av et (ekstra) marginalt tog, med en lineær regresjonslinje | 17 |
| 4.6 | Marginalkostnaden for persontrafikkoperatørene for antall reisenede | 17 |
| 4.7 | Tilbud og etterspørsel i persontrafikkmarkedet | 18 |
| 5.1 | Figuren viser reiser før og etter prisdifferensiering for henholdsvis reiser ut av Oslo (venstre) og inn til Oslo (høyre). | 20 |

Innhold

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | Innledning | 1 |
| 1.1 | Metode | 2 |
| 2 | Problemstilling | 3 |
| 3 | Strekningen Oslo-Ski | 4 |
| 3.1 | Kapasitetsutnyttelse i dag | 5 |
| 3.2 | Sammenheng mellom kapasitetsutnyttelse og punktlighet | 5 |
| 4 | Analyse av mulige løsninger | 7 |
| 4.1 | Tradisjonelle metoder for økt kapasitetsutnyttelsen | 7 |
| 4.1.1 | Kapasitetsforbedring for dobbeltsporet strekning | 7 |
| 4.1.2 | Kapasitetsutnyttelse for enkeltsporet strekning | 8 |
| 4.1.3 | Potensialet for strekningen Oslo-Ski | 8 |
| 4.2 | Dynamisk ruteplanlegging | 9 |
| 4.2.1 | Ruteplanlegging i Tyskland | 9 |
| 4.2.2 | Bestilling av ekstra sportid i Norge | 10 |
| 4.2.3 | Implementering | 10 |
| 4.3 | Vedlikehold | 11 |
| 4.4 | Tidsdifferensiering av passasjertransportpriser | 13 |
| 4.4.1 | Etterspørsel | 13 |
| 4.4.2 | Tilbud | 15 |
| 4.4.3 | Markedspriser | 18 |
| 5 | Diskusjon | 19 |
| 6 | Konklusjon | 21 |
| 7 | Videre arbeid | 22 |
| A | Tall Oslo-Ski | ii |
| B | MATLAB-kode | iii |

Kapittel 1

Innledning

Punktlig og effektiv jernbane

Bevilninger til norsk jernbane har de siste tiårene vært lave, noe som har ført til et etterslep i vedlikeholdet og lave investeringer i ny infrastruktur. Dette har resultert i en punktlighet togpassasjerer ikke er fornøyd med. En effektiv jernbane karakteriseres av høy punktlighet, kort reisetid, høy frekvens og fleksible løsninger for godstransport. Jernbane er et tverrfaglig teknisk system med mange interessenter og et miljøvennlig transportmiddel. Til tross for at transportbehovet i Norge har økt de siste årene, har togtransport holdt seg stabil, og taper derfor markedsandeler. På ett tiår har bevilgningene til jernbane blitt doblet. For å nå disse målene og tilby et tilfredsstillende tilbud, kreves det nytenkning og innovasjon.

Prosjektet er en del av faget TBA4853 Ekspert i Team ved NTNU våren 2012. Gruppens problemstilling for prosjektet er:

Hvordan kan kapasiteten på sterkt trafikkerte jernbanestrekninger utnyttes bedre?

I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i å finne tiltak for å forbedre kapasiteten på høyt belastede jernbanestrekninger. Gruppen har valgt å se på strekningen Oslo-Ski, og det er tatt utgangspunkt i hvordan tilstanden på denne strekningen er i dag. Siden det allerede er et pågående prosjekt for utvidelsen av sporkapasiteten her, er det ikke laget noen spesielle forslag til tiltak for akkurat denne strekningen. Derimot gir rapporten forslag til generelle tiltak som kan benyttes på overbelastede strekninger.

Gruppen har valgt å se på fire forskjellige måter å utnytte eksisterende sporkapasitet. Den viktigste av disse er prisdifferensiering for togbilletter i og utenfor rushtid. Det er i tillegg sett på dynamisk ruteplanlegging, utnyttelse ved lik toghastighet og viktigheten av rett vedlikehold av banestrekningen.

1.1 Metode

Arbeidsprosessen ble delt opp i ulike stadier med glidende overganger. I startfasen var arbeidet preget av datainnsamling i form av litteratursøk, intervjuer og e-postkorrespondanse. Da det var samlet tilstrekkelig informasjon, ble den sortert ut fra hva som var viktig i forhold til løsningen av problemstillingen. Innad i gruppen ble det deretter fordelt arbeidsoppgaver innen de ulike løsningene, og fordelingen ble gjort med tanke på hvilken fagkompetanse hvert grupped medlem kunne bidra med. Når løsningene var utarbeidet ble de vurdert etter følgende kriterier; antall reiser, økonomi, miljø, tidsforbruk og kundetilfredshet. I siste fase av prosjektet ble det fokusert på vurderingskriteriene for fagrapporten for å sikre at alle elementene var tatt med.

Kapittel 2

Problemstilling

Problemstillingen som gruppen har tatt utgangspunkt i er som følger:

Hvordan kan kapasiteten på sterkt trafikkerte jernbanestrekninger utnyttes bedre?

Hovedmål

- Analysere kapasitetsutnyttelsen ut i dag.
- Analysere tiltak som kan innføres for å bedre kapasitetsutnyttelsen.

Begrunnelse for valg av problemstilling

Problemstillingen ble valgt med utgangspunkt i kapasitet på jernbanenettet fordi dette var et mye diskutert tema under seminaret den 25. januar i Stjørdal. Etter diskusjoner rundt forskjellige problemstillinger innad i gruppen ble de fleste forslagene relatert til kapasitet. Problemstillingen ble valgt fordi oppslutningen og interessen for denne problematikken var størst innad i gruppen. I den sammenheng kan det refereres til samarbeidsavtalen vår der beslutninger blir tatt på grunnlag av flertallet etter diskusjon. Problemstillingen er veldig aktuell og relevant for å kunne oppnå en effektiv jernbane, noe som er grunnen til gruppens interesse og motivasjon.

Nytte for jernbanesektoren

Temaet for landsbyen er Punktlig og effektiv jernbane, og dette er et dagsaktuelt tema for jernbanesektoren. Rapporten fokuserer på effektivisering og utnyttelse av kapasiteten på jernbanenettet. Basert på problematikk i jernbanesektoren som ble presentert på seminaret, kan nytten sies å være stor ved gode forbedringsforslag for utnyttelse og optimalisering av jernbaneavviklingen.

Kapittel 3

Strekningen Oslo-Ski

Strekningen mellom Oslo og Ski ble åpnet som enkeltspor i 1879, og ble i 1939 ferdigstilt som dobbeltspor. Strekningen ble så elektrifisert på slutten av 30-tallet, og fjernstyring av trafikken kom på 70- og 80-tallet [7]. I dag er det planlagt å bygge et ekstra dobbeltspor på strekningen Oslo-Ski med en dobbeltsporet tunnel uten stopp. Utbygningen skal ferdigstilles innen 2019 [9].

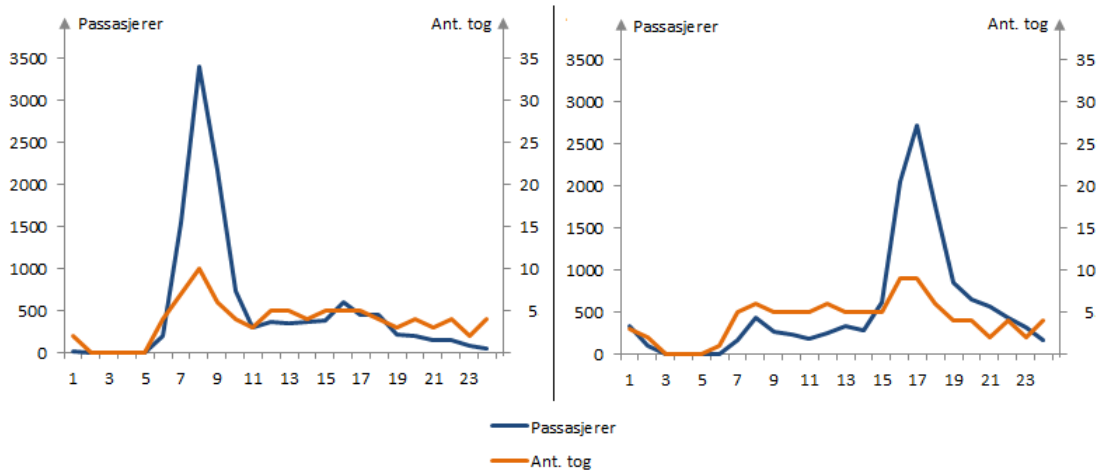
Oslo-Ski er i dag den jernbanestrekningen i Oslo-området som det har den største kapasitetsutfordringen. I dag kjøres det til sammen elleve ulike personruter på strekningen. Et estimat basert på ruteplan i [3] og [2] gir at strekningen Oslo-Ski utgjør en vektet andel på 54,2% av alle rutene som trafikkerer jernbanestrekningen, utregningen finnes i tillegg A. Dette er et høyt tall for den korte strekningen på 24,31 km[2], og skyldes at det går svært mye lokaltrafikk i området. Overbelastning fører til at det er mindre slakk i systemet slik at det er vanskelig å rette opp igjen en forsinkelse. Dette fører også til at saktegående lokaltog bidrar til forsinkelser for hurtiggående tog som kommer bak.

I området regner man med en vekst på 30% i både arbeidsplasser og befolkning frem mot 2025 [13], og at transportetterspørselen vil øke like mye. Kapasiteten på vegnettet i Oslo-området er sprengt, og det er et ønske om at de nye reisene skal fordeles på mer miljøvennlige alternativer. I Norge er det miljøvennlig å ta tog, men i følge Transportøkonomisk institutt [4] er kilden til energi avgjørende om tog er miljøvennlig eller ikke. Hvis det blir produsert kraft fra ikke-forurensende kilder, slik som vannkraft, vil elektriske tog som benytter seg av denne kraften være svært miljøvennlige. Hvis derimot kraften som brukes på de elektriske togene kommer fra fossile kilder, slik som naturgass og kull, vil det derimot ikke være like miljøvennlig. I Oslo-området er alle toglinjer elektrifisert slik at det er gode muligheter for å benytte elektrisk kraft til tog [18].

Hoveddelen av Norges eksport og import av landbasert gods skjer gjennom Østfold. I dag benyttes som oftest trailere for å frakte godset, men av miljøhensyn er det bedre dersom disse ble overført til bane. Slik situasjonen i dag, med svært høy kapasitetsutnyttelse, vil det ikke være mulig å overføre mer gods fra veg til bane [13].

3.1 Kapasitetsutnyttelse i dag

NSB har oppgitt passasjertall for våren 2010 mellom Oslo S og Nordstrand. Det antas at disse tallene er representative for strekningen Oslo-Ski. Figur 3.1 viser fordelingen av passasjerer og passasjertog i hver retning. Her vises det at antall passasjerer er svært ulikt fordelt utover døgnet, og at det kjøres flest tog når det er flest passasjerer. Videre er ruteplanen for strekningen analysert for år 2011 [2].



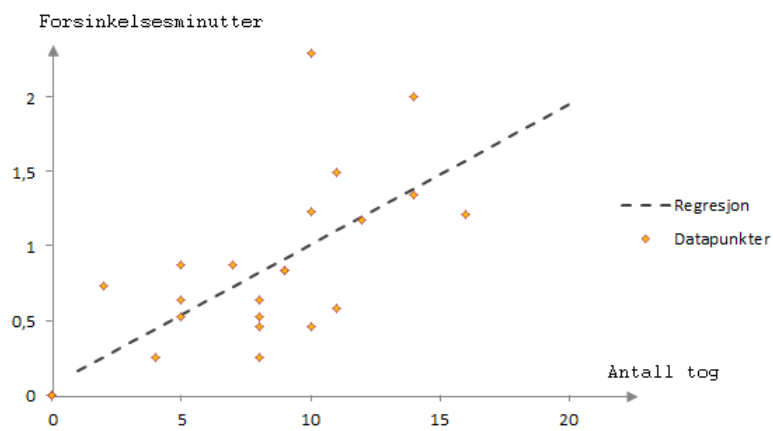
Figur 3.1: Antall passasjerer og passasjertog inn til Oslo (venstre) og ut av Oslo (høyre).

3.2 Sammenheng mellom kapasitetsutnyttelse og punktlighet

Økt kapasitetsutnyttelse på en strekning fører normalt til lengre kjøretider, det vil si at punktligheten går ned [17]. Jernbaneverket har oppgitt forsinkelsesdata for strekningen Oslo-Ski, som er gjengitt i tillegg C. Figur viser sammenhengen mellom gjennomsnittlig antall forsinkelsesminutter¹ og antall tog på strekningen basert på [2]. Det er utført en lineær regresjon ved hjelp av MATLAB, da dette viser seg å være regresjonen som passer datapunktene best. Ligning (3.1) viser resultatet fra regresjonsanalysen, hvor w er forsinkelsesminutter og t er antall tog på strekningen.

$$w = 0,09424t + 0,0701 \tag{3.1}$$

¹der et tog er ankommet før tiden er forsinkelsesminutter satt til 0



Figur 3.2: Forsinkelsesminutter per tog og antall samtidige tog på strekningen.

Kapittel 4

Analyse av mulige løsninger

Dette kapitlet tar for seg ulike løsninger som kan forbedre kapasitetsutnyttelsen på sterkt belastede jernbanestrekninger. Først blir tradisjonelle metoder presentert, deretter kommer forslag til nye løsninger. Analysen tar utgangspunkt i strekningen Oslo-Ski.

4.1 Tradisjonelle metoder for økt kapasitetsutnyttelsen

Tradisjonelt benyttes to metoder for å øke kapasiteten på en eksisterende jernbanestrekning, utbygging av sporkapasitet eller hastighetsregulering av togene på strekningen. Kapasitetsøkning gjøres ulikt for enkelt- og dobbeltspor. På et enkeltspor vil økt hastighet gi størst kapasitet mens dette ikke nødvendigvis er tilfellet på dobbeltsporet linje [20].

Jernbaneverket opererer med en kapasitetsutnyttelse på 80 % i rushtid og 60 % utenom som maksimal praktisk utnyttelse av strekning. Ved en utnyttelse over 80 % mangler strekningen kapasitet. For jernbanene i andre europeiske land angis kapasitetsutnyttelse mellom 60 % og 80 % som maksimal utnyttelse av jernbanelinjen [20].

4.1.1 Kapasitetsforbedring for dobbeltsporet strekning

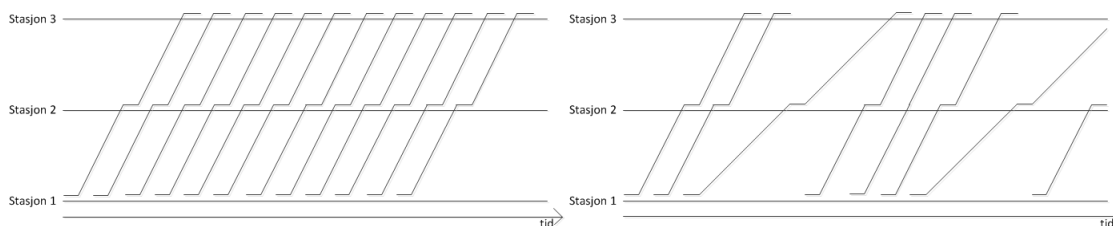
Kapasiteten på en dobbeltsporet jernbanestrekning er oppgitt i antall tog per time på en gitt strekning. Maksimalt antall tog i løpet av én time avgjøres av tidsintervallet mellom togene. Ved å redusere tidsintervallene mellom togene økes kapasiteten på jernbanelinjen, men risikoen for følgeforsinkelser vil øke og punktligheten vil være vanskeligere å oppfylle.

Ligning (4.1) gir en formel for kapasiteten C til en dobbeltsporet strekning, hvor T er tidsrommet (oftest én time) og f_{min} er minste følgetid for tog.

$$C = \frac{T}{f_{min}} \quad (4.1)$$

Det er identifisert fire faktorer som avgjør tidsintervallene mellom togene; sikkerhetsmessige aspekter, ulik fremføringstid, stasjonsopphold og tidsbuffer mellom togene.

For dobbeltsporet jernbane vil kapasiteten øke dersom alle togene går med lik hastighet. Det kan gjøres ved å heve eller senke hastigheten til alle tog, se figur 4.1. En annen viktig faktor for kapasiteten er stasjonsopphold. Ved å fjerne stoppesteder der kun enkelte tog stopper kan kapasiteten på strekningen øke.



Figur 4.1: Kapasitetsutnyttelse ved henholdsvis lik hastighet (venstre) og ulik hastighet (høyre)

4.1.2 Kapasitetsutnyttelse for enkeltsporet strekning

På enkeltsporede strekninger vil tiden togene bruker mellom kryssingssporene angi hvor mange tog som kan gå på strekningen i løpet av én time. For slike strekninger vil økt hastighet påvirke togkapasiteten direkte. Følgende faktorer for kapasitetsøkning er identifisert; flere kryssingsspor, forbedring av kryssingsspor, økt hastighet, færre stasjonsopphold og mindre møtende trafikk. Av faktorene er kryssingsspor den største begrensingen for kapasiteten på enkeltsporet strekning. Dersom togene ikke kan krysse på stasjonene må kryssingssporene legges slik at togene kan passere hverandre i rett tid i forhold til ruteplanen. Det er ikke bare total lengde på kryssingssporene som er avgjørende, men også hvor de er plassert. Enkeltsporet strekning er sensitiv for forsinkelser på grunn av at togene må møtes ved gitte punkt, og forsinkelser vil føre til at begge retninger på strekningen blir påvirket og som fører til at forsinkelsen forplanter seg. Hvis følgetiden reduseres vil faren for forsinkelse øke ytterligere.

4.1.3 Potensialet for strekningen Oslo-Ski

Strekningen Oslo-Ski er i dag dobbeltsporet. Den enkleste måten å forbedre kapasiteten på er å sørge for lik fremføringstid for alle tog på denne strekningen.

Mellom klokken syv og åtte ankommer elleve tog til Oslo S via strekningen Oslo-Ski [2]. I denne tidsperioden er kapasiteten på strekningen fullt utnyttet for tog inn til Oslo. Kapasiteten på denne strekningen er i hovedsak begrenset av ulikt antall stoppesteder for togene. Både lokaltogene seg i mellom og regionaltogene har forskjellig framføringshastighet på denne strekningen.

Lokaltogene bruker mellom 6 og 8 minutter lenger tid på strekningen Oslo-Ski enn regionaltogene. Lokaltogene bruker også tre til fem minutter lenger tid enn godstogene, men godstogene

kjører ikke i rush-tid i retningen med høyest trafikk, altså inn til Oslo om morgenen og ut av Oslo om ettermiddagen.

Lengste framføringsdifferanse er åtte minutter og dette forekommer for tre tog i løpet av tidsperioden. Den tettste frekvensen mellom togene er tre minutter ved Ski. Det betyr at dersom alle togene kjører med samme hastighet og stopper på samme sted, vil det kunne gå 20 tog på banestrekningen i løpet av en time. En stor forbedring vil derfor oppnås om alle lokaltogene brukte like lang tid på strekningen. Det vil gi mulighet for kjøring av fire ekstra lokaltog i denne perioden. Dersom alle regionaltogene også stoppet på de samme stasjonene vil kapasiteten kunne utnyttes fullt ut.

Å få alle tog til å stoppe på de samme stasjonene og ha lik hastighet er utfordrende, og er en for enkel løsning. Regionaltog frakter primært passasjerer over lengre strekninger, og sammenfallende stoppesteder kommer i konflikt med lokaltogene. Tiltaket med kjøring med lik framføringstid er likevel et effektivt virkemiddel og det benyttes for tog som går gjennom Oslostunnelen [2].

4.2 Dynamisk ruteplanlegging

Dynamisk ruteplanlegging er et system for kjøp av sportid for ekstratog for gods- og persontogsoperatører. Ved hjelp av dette systemet kan operatørene kjøpe sporplass til tider der sporet er ledig. Ruteplanleggingen gjøres ved hjelp av et elektronisk bestillingssystem som operatørene har tilgang til.

4.2.1 Ruteplanlegging i Tyskland

I Tyskland bestilles ekstra sportid via Deuche Bahn Trassenportal. Prisen på traseen blir beregnet eksakt ved bestilling, men jernbaneoperatørene kan med den forenklete ligningen (4.2) forhåndsberegne prisen på linjeplass. Formelen benytter forhåndsberegnede faktorer for togtype, hastighet, kjørestrekning og region, hvor p er pris og s er strekning i kilometer.

$$\frac{p}{s} = S \cdot f_p \cdot f_s + f_s \cdot f_r \quad (4.2)$$

De andre variablene i ligning (4.2) er forklart i tabell 4.2.1. Dersom bestillinger til to ulike operatører kolliderer, vil en linjekoordinator megle om tidspunkt og pris for togene. I enkelte tilfeller må togene gå på andre traseer enn planlagt. Prisen på frakten kan derfor avvike fra den forhåndsberegnede prisen [5].

Det dynamiske rutebestillingssystemet i Tyskland er delt opp i fire ulike kategorier. Hver kategori i tabell 4.2.1 inneholder faktorer for beregning av pris som vist i ligning (4.2). Generelt er faktorene for traseer med høy hastighet større enn for banestrekninger med lav hastighet. Tabellen viser de viktigste forhåndsberegnede faktorene for både gods- og persontogtraseer oppgitt i pris per kilometer.

Tabell 4.2.1: Kategorier

| Strekningsskategorie | Produktfaktor (f_p) | Særfaktor (f_s) | Regionsfaktor (f_r) |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Fjernstrekning | Ekspresstrasé | Dampdrevet tog | Regional faktor |
| Tilpasset strekn. | FV - Frakt - trasé | Søknad for ekstratog | |
| Lokalstrekning | MV - Frakt - trasé | Overskridelse av lastprofil | |
| | PV-LV-trasé | Lastinnhold | |
| | Ekspresstrasé | | |
| | Standardtrasé | | |
| | MV - Frakt - trasé | | |
| | Tilbringer trasé | | |

I Tyskland finnes det egne for hurtiggående og tregtgående tog. Dette fører til at det er relativt lik hastighet på de forskjellige togene på linja og togene kan da gå tettere.

4.2.2 Bestilling av ekstra sportid i Norge

Jernbanelinjene er eid av staten og forvaltes av Jernbaneverket. I Norge i dag er det slik at operatørene ikke betaler for bruk av sporet slik som i Tyskland. Gardermobanen og Ofotbanen er unntak hvor det betales kjøreveisavgift. Dersom en operatør ønsker å kjøre tog utenfor oppsatt rutetabell, må operatøren søke om dette til Jernbaneverket. Det er ingen avgift på dette.

Antall traseer i Norge er svært lavt i forhold til Tyskland. Det betyr at det kun er i og rundt noen av de største byene det er egne spor der det kun fraktes gods. I hovedsak benytter passasjertog og godstog de samme linjene. Det betyr at eventuell trasédifferensiering er lite aktuelt i Norge. Det kan likevel være interessant å se på togets hastighet i forhold til strekningens hastighetsgrense, som diskutert i kapittel 4.1.

4.2.3 Implementering

Det knyttes en del utfordringer til implementering av et dynamisk ruteplanleggingssystem i Norge. På grunn av færre linjer og linjetyper vil det være nødvendig å organisere bestillingen annerledes i Norge enn i Tyskland. I Norge er det en del sterkt trafikkerte strekninger hvor sporkapasiteten må utnyttes maksimalt. Det kreves derfor at det på forhånd finnes bestemte tidspunkter og ruter togene må følge for å kunne kjøre flest mulig tog på strekningen.

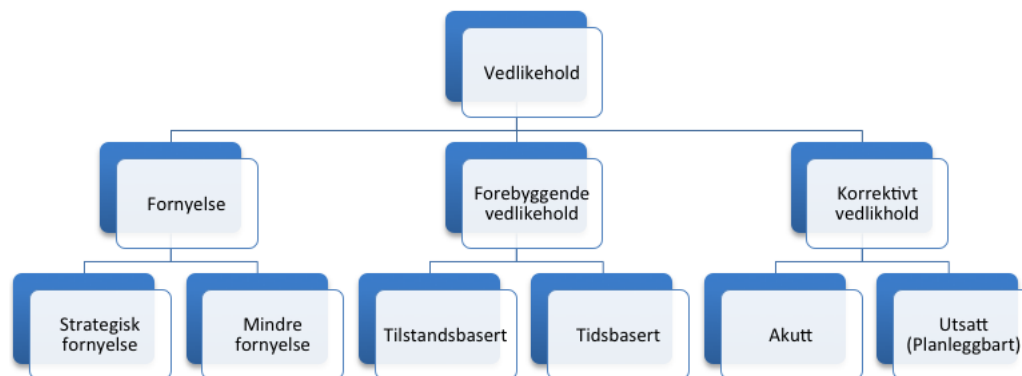
Fordelen med et system for dynamisk ruteplanlegging er at det vil forenkle jernbaneoperatørens søkeprosess for å sette opp ekstratog. Dette må gjøres ved å utvikle datasystemer som gjør det mulig for Jernbaneverket og operatørene å enkelt kunne søke etter ledig sportid og bestille plass. Behandlingstiden for søknader vil bli forkortet og det vil være mulig å være mer fleksibel for særoppdrag. Systemet kan også føre til at ledig sportid lettere kan utnyttes. Utvikling og

igangkjøring av et slikt dynamisk system vil ta tid. Det vil også være nødvendig å planlegge rutetabellene slik at det blir laget tidsrom for disponible tog, eventuelt kan det legges inn flere ruter som kan bestilles. Store nasjonale endringer av rutetabeller blir oftest gjort ved større endring i infrastrukturen, og implementering av et slik system bør derfor iverksettes ved en omfattende endring.

Det må også bestemmes om bruk av linjene utenfor oppsatt ruteplan skal koste togselskapene ekstra. I dag betales det, som tidligere nevnt, ikke for bruk av linjene. En løsning kan være at Jernbaneverket regulerer hvor mange timer hvert togselskap maks kan ta ut til ekstrakjøring ut i fra behov og hvor stor andel hvert selskap har av oppsatt ruteplan. Eventuelt så kan det innføres avgift ved bruk av ekstratimer utover ruteplan.

4.3 Vedlikehold

Høy kapasitetsutnyttelse fører til hyppigere togavganger og dermed større slitasje på jernbanetraseen. Dette fører til at vedlikehold på traseen må forekomme hyppigere, men når tog kjører på strekningen blir det lite tid til og vanskeligere å utføre vedlikehold. Det er derfor viktig å utnytte den tiden som er tilgjengelig for vedlikehold effektivt, typisk om natten, som vist i kapittel 3.1. I stor grad handler denne effektiviseringen av vedlikehold om strukturert planlegging, prioritering og optimalisering av vedlikehold, altså vedlikeholdsstyring. Vedlikehold av jernbanen kan deles i tre typer som vist i figur 4.2, henholdsvis fornyelse, forebyggende vedlikehold og korrektivt vedlikehold.

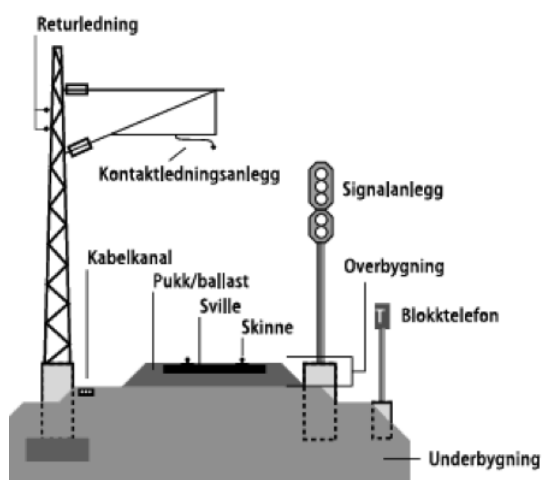


Figur 4.2: Inndeling av vedlikeholdstyper

Vedlikehold i form av fornyelse er oppdatering og utskifting av gamle komponenter til fordel for nye komponenter, og kan deles i strategisk og mindre fornyelse. Korrektivt vedlikehold er ”aktiviteter som må gjøres for å gjenvinne en krevd funksjon” [15], og kan deles i to typer; akutt og utsatt. Akutt korrektivt vedlikehold må utføres omgående på grunn av en tapt kritisk

funksjon, mens utsatt korrektivt vedlikehold er mulig å planlegge før utførelse. Innen forebyggende vedlikehold skilles det mellom tilstandsbasert og tidsbasert. Tilstandsbasert vedlikehold er ”aktiviteter som blir utført for å avdekke tilstandsendringer og forlenge levetider” [15] og tidsbasert vedlikehold er ”aktiviteter for å opprettholde en krevd funksjon” [15].

I denne oppgaven er en analyse av vedlikehold av jernbanetraseen inkludert fordi det er en viktig faktor for at kapasiteten skal kunne utnyttes på en strekning med mye trafikk. Hvis riktig forebyggende vedlikehold blir utført til riktig tid vil opptiden for jernbanetraseen bli høyere og punktligheten har dermed gode forutsetninger til forbedring. Med jernbanetraseen menes komponentene som er illustrert i figur 4.3.



Figur 4.3: Jernbanetrasés komponenter [16]

For å effektivisere og prioritere vedlikeholdsaktiviteter er tilstandskontroll et mulig tiltak, som er en del av forebyggende, tilstandsbasert vedlikehold. Tilstandskontroll er ”Påvisning og innsamling av informasjon og data som indikerer tilstanden til en maskin.” [1]. Ved å benytte tilstandskontroll for jernbanetraseen trenger ikke komponentene skiftes ut på grunnlag av faste prosedyrer, men ved behov. Dette betyr at vedlikehold og utskiftninger vil forekomme sjeldnere og vil være i større forebyggende grad, samt at levetiden til komponentene kan maksimeres. Som følge av dette blir vedlikeholdet mindre tidskonsumerende, og dermed mer kostnadseffektivt.

I dag kontrolleres skinner for sprekker ved hjelp av ultralydkontroll på en målevogn med automatisk feilregistreringer [8]. Målevognen merker av de områdene der det kan være antydninger til sprekker og for disse områdene blir det utført en manuell etterkontroll. Denne etterkontrollen blir utført ved enten en visuell kontroll eller en kontroll med en håndholdt ultralydtralle. Målet med slik ultralydkontroll er å avdekke sprekker før de utvikles til skinnebrudd, som er en kritisk feil.

En utfordring ved ultralydkontroll av skinner omfatter at det er tidkrevende da målevognen holder en hastighet på 40-50 km/h, noe som også gjør det vanskelig å sette opp kjøring av målevogn i en lite fleksibel ruteplan. En annen utfordring er at kontrollintervallene må optimaliseres på

grunnlag av ekspertuttalelser, virkelige observasjoner og resultater fra litteraturen [19]. I tilfeller der de optimale kontrollintervallene er relativt hyppige vil mengden data som innsamles øke. Innkjøp av dyrt og avansert måleutstyr som samler inn mye data, men ingen klar plan for hvordan og til hva denne dataen skal brukes til er en av de hyppigste feilene ved implementering av tilstandsbasert vedlikehold [6].

Til tross for utfordringer knyttet til økt bruk av forebyggende og tilstandsbasert vedlikehold er fordelene store. Ved mindre andel korrektivt vedlikehold, til fordel for forebyggende vedlikehold, vil både opetiden til jernbanetraseen og kapasitetsutnyttelsen øke.

4.4 Tidsdifferensiering av passasjertransportpriser

I dag betaler reisende samme pris uavhengig av når på døgnet reisen skjer. For at jernbanen skal være samfunnsøkonomisk effektiv, må den sosioøkonomiske velferden maksimeres. Prissetting basert på marginalkostnaden til operatøren er et prinsipp som gir en samfunnsøkonomisk effektiv jernbane. Dette innebærer at prisen operatøren tilbyr kunden er lik kostnaden operatøren har av å frakte en passasjer ekstra. Tilbudet til operatørene varierer i og utenom rushtid. Mye av materiellet som benyttes i rushtiden driftes kun i en liten del av døgnet, og står parkert resten. Dette binder opp kapital, og fører til en større kostnad for operatørene. Samtidig viser kapittel 3.2 at høyere kapasitetsutnyttelse medfører lavere punktlighet. Dette fører til en kostnad for operatørene i form av økt materiellbruk og tjenestetid, samt en ekstrakostnad for passasjerene i form av økt ventetid. Etterspørselen er også svært forskjellig i og utenom rushtid. I dette kapitlet analyseres en normal tirsdag, da dette synes å være ukedagen med høyest trafikk.

På bakgrunn av at situasjonen i rushtid er svært ulik situasjonen utenom rush foreslås en differensiering av takstene, hvor prisen i rushtid er ulik prisen utenom rushtid. Dette vil bidra til å øke den samfunnsøkonomiske effektiviteten i passasjermarkedet, og i tillegg vil kapasitetsutnyttelsen være jevnere utover døgnet, fordi passasjervolumet vil øke utenom rush og bli noe lavere i rushtid. Dette er en mer effektiv utnyttelse av jernbanen og vil medføre et mer rettferdig system, der passasjerene i større grad betaler for den kostnaden den marginale reisen medfører. Basert på figur 3.1 i kapittel 3.1, defineres rushtid som tidspunktene 06:00-10:00 for reiser inn til Oslo, og 15:00-19:00 for reiser ut av Oslo, da disse tidspunktene har høyest antall reisende (over 700 per time).

4.4.1 Etterspørsel

Etterspørselen deles i to; en for rushtid og en for utenom rushtid. Ligning (4.3) definerer priselastisiteten ϵ for passasjertrafikk som forholdet mellom prosentvis endring i antall reiser q og endring i pris p , og uttrykker hvor sensitiv kunder er for prisendringer.

$$\epsilon \triangleq \frac{dq/q}{dp/p} = \frac{dq}{dp} \frac{p}{q} \quad (4.3)$$

Formen på etterspørselkurven er i seg selv ikke observerbar i markedet, siden man til enhver tid befinner seg på ett punkt på pris-etterspørsel-kurven. Det antas derfor at etterspørselen varierer med konstant elastisitet. Elastisiteten antas å være $-0,2$ for rushtid og $-0,4$ utenom rushtid, som samsvarer med [12] og [11]. Ligning (4.3) blir derfor en separabel differensialligning med løsning som vist i ligning (4.4), hvor c er en konstant.

$$q(p) = cp^\epsilon \quad (4.4)$$

Prisen på reiser i dag antas å følge inntektssatsene for Metodehåndbok for samfunnsøkonomiske analyser for jernbanen [14]. Denne antagelsen brukes fordi informasjon om andelen av ulike reisetypene ikke er offentlig, og derfor kan ikke gjennomsnittsprisen operatøren mottar brukes. Videre gjøres den forenklede antagelsen at alle reiser har en lengde på 24,31 km, som tilsvarer strekningen Oslo-Ski, og at 54,2 % av grunntaksten fordeles til strekningen Oslo-Ski, da dette er andelen Oslo-Ski utgjør av alle ruter som går på denne banen. Tabell 4.4.1 viser prisantagelsene. Det er ikke funnet noen god kilde på de ulike andelenene i tabellen, disse er derfor basert på antagelser og kunnskap fra bransjen.

Tabell 4.4.1: Prisantagelser for dagens etterspørsel (2009-kr)

| | Arbeid | Fritid | Forretning |
|---|--------|--------|------------|
| Antatt andel i rush, a | 85 % | 5 % | 10 % |
| Antatt andel utenom rush, a | 25 % | 70 % | 5 % |
| Grunntakst, g | 14,10 | 19,13 | 24,17 |
| Distanseavhengig ledd, d | 0,45 | 1,06 | 1,34 |

Prisen er funnet ved bruk av ligning (4.5), hvor i refererer til de ulike kundesegmentene i tabell 4.4.1. Dette gir en pris på kr 26 per reise i dag¹.

$$p = \sum_{\forall i} a_i(0,542g_i + 24,31d_i) \quad (4.5)$$

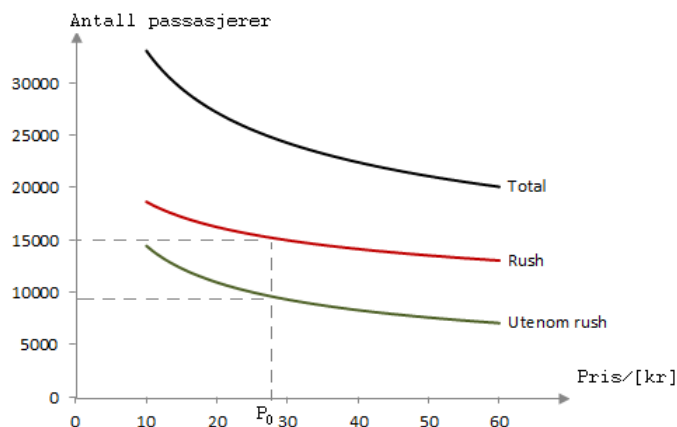
For å bestemme konstanten c i ligning (4.4), brukes dagens etterspørsel. I rushtid er antall reiser 15 259, mens reiser utenom rushtid er 9 673, basert på tallene i kapittel 3. c_r og c_u kan tolkes som antall reisende dersom prisen hadde vært 0 for henholdsvis rush og utenom rush, og er lik

$$c_r = \frac{q_{0,r}}{p_0^{\epsilon_r}} = 29\,527 \quad \text{og} \quad c_u = \frac{q_{0,u}}{p_0^{\epsilon_u}} = 36\,221$$

0-notasjonen referer til dagens situasjon, r til rush og u utenom rush.

Etterspørselsfunksjonene er nå bestemt, og vises i figur 4.4. Figuren viser at det er stor forskjell i etterspørselen for de to tidssegmentene.

¹Prisen er funnet ved å ta andelen reisende i rush (fra kapittel 3) multiplisert med prisen for rush pluss andel reisende utenom rush multiplisert med prisen utenom rush.



Figur 4.4: Etterspørselsgrafer for henholdsvis rush og utenom rush.

4.4.2 Tilbud

For å beregne tilbudsfunksjonen er marginalkostnadene til operatørene estimert. Enhetssatsene i Metodehåndboken [14] for togtypen Lokal 200 er brukt. Det er tre kostnadsdrivere for operatørene; materialbehov, kjørelengde og tjenestetid. I tjenestetiden ligger også forsinkelseskostnad, som utgjør den økte tjenestetiden som skyldes forsinkelser.

For materialbehov brukes en døgnetsats per togsett som er summen av kapitalkostnaden (som utgjør en annuitet av investeringen fordelt utover den økonomiske levetiden) og klargjøringskostnader. Annuiteten A er gitt ved ligning (4.6).

$$I = \frac{A}{r} \left(1 - \frac{1}{(1+r)^n} \right) \implies A = \frac{rI}{1 - \frac{1}{(1+r)^n}} \quad (4.6)$$

Her er $I = \text{kr } 76,1$ millioner som er totalkostnaden av investeringen, r er kalkylerenten gitt til 4,5% og $n = 25$ år er den økonomiske levetiden [14]. Klargjøringskostnaden G per dag er gitt til $\text{kr } 1420$ [14]. Fra [3] og [2] estimeres materiellbehovet i helger og helligdager² til to tredeler av materialbehov på hverdager. Derfor fordeles annuiteten på 365 dager for antall tog, $t \leq 10$ og på $365 - 2 \cdot 52 - 15 = 246$ dager for $t > 10$. For å finne den daglige materiellkostnaden K_m på strekningen Oslo-Ski, multipliseres summen av annuiteten og klargjøringskostnaden med 54,2%, som utgjør andelen av materiellbruken for Oslo-Ski (som diskutert i kapittel 3).

$$K_m = \begin{cases} 54,2\% \cdot \left(\frac{A}{365} + G \right), & t \leq 10 \\ 54,2\% \cdot \left(\frac{A}{246} + G \right), & t > 10 \end{cases} \implies K_m = \begin{cases} \text{kr } 8\,390, & t \leq 10 \\ \text{kr } 11\,986, & t > 10 \end{cases}$$

Kjørelengdekostnaden per reise K_k er summen av energikostnaden $E = 4,56$ kr/settkm og ved-

²det er 15 helligdager i 2012

likeholdskostnader $V = 15,21$ kr/settkm multiplisert med antall kjørelengde (24,31 km) [14].

$$K_k = (24,31 \text{ km}) \cdot (E + V) = \text{kr } 480,61 / \text{sett}$$

Tjenestetidkostnaden K_t er summen av lønn og sosialekostnader for lokfører (kr 800) og togfører/konduktør (kr 762) multiplisert med tjenestetid. Tjenestetiden er estimert til gjennomsnittlig kjøretid (estimert til 27,4 minutter ved hjelp av ruteplanen) multiplisert med 1,3, som anbefalt i [14]. Dette gir en total tjenestetid på 35,62 minutter for strekningen Oslo-Ski.

$$K_t = (\text{kr } 800 + \text{kr } 762) \cdot \frac{35,62}{60} = \text{kr } 927,31$$

For å uttrykke marginalkostnaden til operatørene ved hjelp av passasjerantall tas det utgangspunkt i dagens passasjerantall vist i kapittel 3. Det antas at for å kjøre et gitt antall passasjerer kreves det antall tog som kjøres i dag på et tidspunkt med dette antall reisende. For å finne antall passasjerer som fraktes av et marginalt tog, er det utviklet en MATLAB-kode, som er lagt ved i tillegg B. Koden antar at alle tog som kjører i en retning i en gitt time har samme passasjerantall. Videre fordeles passasjerene på togene i hver retning til annen hvert tog, det vil si at det antas at operatørene uansett vil kjøre et minimum antall tog i hver retning, selv om etterspørselen er ulik i de to retningene. Den siste antagelsen fører til en oscillerende kurve. Det er gjort en polynomisk regresjon på kurven, og den lineære ligningen til regresjonen vises i ligning (4.7).

$$q(t) = 2917 - 159,9t \quad (4.7)$$

Regresjonen passer godt, hvor q er det marginale passasjerantallet på tog nummer t . Figur 4.5 viser grafen for antall tog som fraktes av et marginalt tog. Ligning (4.8) gir totalt antall passasjerer Q , som er arealet under kurven i figur (4.5), eller integralet av ligning (4.7).

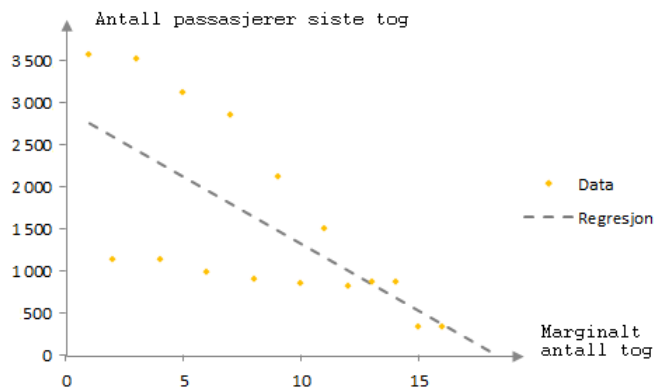
$$Q(t) = 2917t - \frac{159,5}{2}t^2 \quad (4.8)$$

Som vist i kapittel 3.2 medfører et økt antall samtidige tog på en strekning flere forsinkelser. Dersom v_t er antall avganger for tog nummer t , utgjør forsinkelseskostnaden K_f per tog for t tog som vist i ligning(4.9).

$$K_f(t) = \frac{(0,09424t + 0,0701)}{60} \cdot (E + V) \cdot 1,3 \quad (4.9)$$

Brøken uttrykker forsinkelsesminutter hentet fra regresjonsanalysen i kapittel 3.2 multiplisert med kostnaden for den ekstra tjenestetiden forsinkelsen medfører. Marginalkostnaden $k_f(t)$ er forskjellen i forsinkelseskostnaden som oppstår når t øker med én enhet, ligning (4.10).

$$k_f(t) = K_f(t) \sum_{i=1}^t v_i - K_f(t-1) \sum_{j=1}^{t-1} v_j \quad (4.10)$$



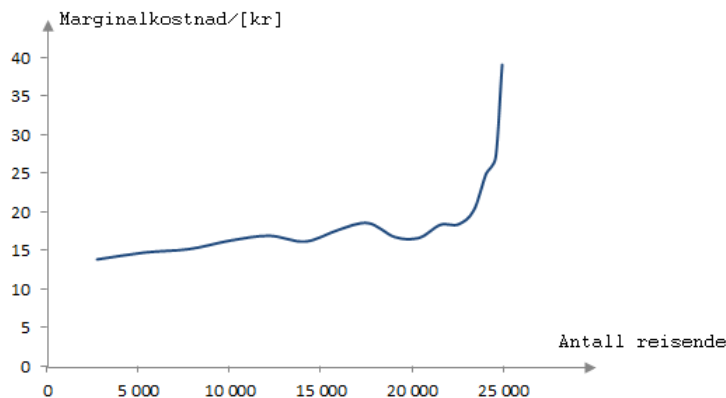
Figur 4.5: Antall passasjerer som blir fraktet av et (ekstra) marginalt tog, med en lineær regresjonslinje

Alle kostnadene er nå identifisert. Den daglige marginalkostnaden k_{tog} av å kjøre ett ekstra tog er gitt i ligning (4.11).

$$k_{\text{tog}}(t) = k_f + v_t(K_k + K_t) + K_m \quad (4.11)$$

For å finne marginalkostnaden $k_{\text{passasjer}}$ uttrykt ved passasjerer, ligning (4.12), deles marginalkostnaden per tog, ligning (4.11), på antall passasjerer som tar toget, ligning (4.7).

$$k_{\text{passasjer}}(t) = \frac{k_{\text{tog}}(t)}{q(t)} \quad (4.12)$$



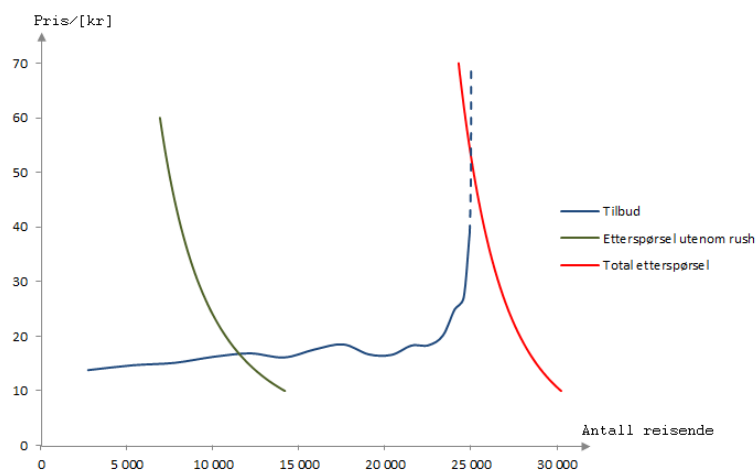
Figur 4.6: Marginalkostnaden for persontrafikkoperatørene for antall reisende

MATLAB-koden i tillegg B er brukt til å regne ut marginalkostnaden per passasjer. Figur 4.6 viser estimatet for marginalkostnaden. Grafen er tilnærmet konveks som forventet, da den er tilnærmet monotont økende. Før antall reisende nærmer seg dagens kapasitet på omtrent 25 000, er marginalkostnaden relativt lav, og stiger forsiktig. Når antall reisende nærmer seg

kapasiteten på linjen stiger marginalkostnaden kraftig. Økningen kan tolkes som skyggeprisen til kapasitetsbetingelsen. Når kapasiteten er nådd vil marginalkostnadeskurven være vertikal; det kan da ikke fraktes flere reisende.

4.4.3 Markedspriser

For å oppnå et effektivt marked må operatørens tilbud (marginalkostnad) være lik etterspørselen. Figur 4.7 viser tilbudskurven og de inverse etterspørselskurvene, som utarbeidet i de to foregående delkapitlene. Tabell 4.4.2 viser resultatene i optimum³. Resultatet viser at dagens prissetting er langt unna samfunnsøkonomisk effektiv. Dersom antagelsene stemmer, bør det være en stor prisforskjell mellom rushtid og utenom rushtid.



Figur 4.7: Tilbud og etterspørsel i persontrafikkmarkedet

Tabell 4.4.2: Resultater fra markedsanalysen

| | Ny pris | Prisendring | Antall reisende | Endring antall reisende |
|--------------------|---------|-------------|-----------------|-------------------------|
| Utenom rush | kr 16 | -38 % | 11 759 | +22 % |
| Rushtid | kr 50 | +92 % | 13 396 | -12 % |
| Totalt | | | 25 155 | +0,9 % |

³For å finne totalt antall (og antallet i rushtid) er optimum funnet for utenom rush, og deretter er rushtidsantallet lagt til dette antallet.

Kapittel 5

Diskusjon

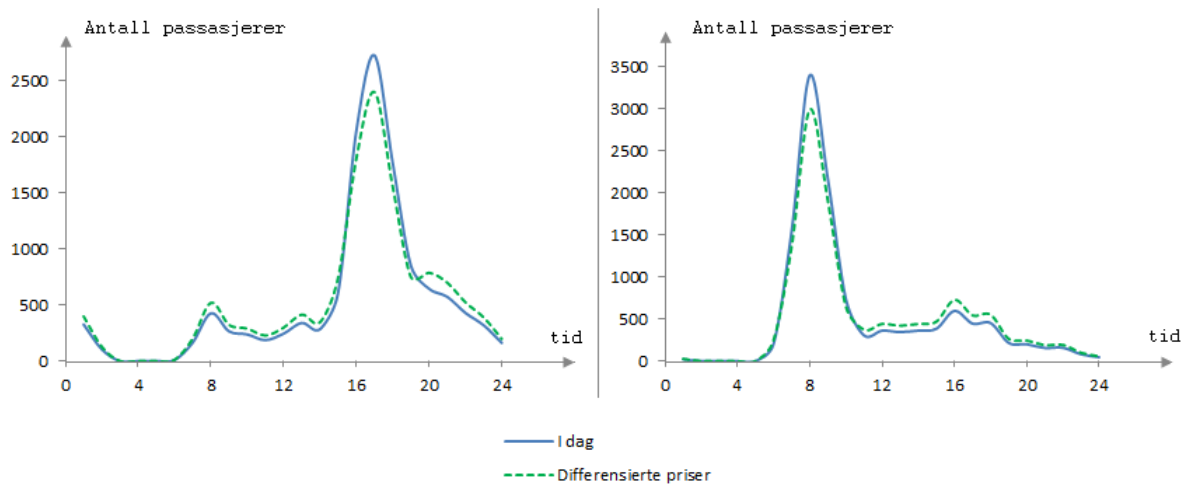
Ved å innføre tidsdifferensierte priser i persontrafikken vil antall reiser i rushtid gå ned noe, og antall reiser utenom rush øker. Denne analysen viser at det totale antall reiser går marginalt opp med 0,9 %, se tabell 4.4.2. Det ligger likevel stor usikkerhet i analysen, først og fremst fordi kostnads- og inntektsdataen er basert på generelle tall i [14]. Operatørenes data er sensitive. I tillegg antar analysen at antall tog som kjører til enhver tid forblir det samme. En bedre tilpasning vil være å endre ruteplanen etter etterspørselen ved tidsdifferensierte priser. Da vil antall tog utenom rush øke og antall tog i rushtid gå noe ned. Dette vil igjen påvirke marginalkostnadene, slik at det bør gjøres en ruteplanendring tilpasset resultatet, og deretter gjøre marginalkostnadsanalysen igjen iterativt inntil en likevekt er oppnådd. På denne måten er det naturlig å tro at det totale antall reisende vil øke ytterligere.

De foreslåtte prisene i analysen må anses som et signal på at dagens prising ikke gjenspeiler marginalkostnaden til operatørene, fremfor å tolkes som reelle forslag til nye priser. Årsaken til dette er at det er for stor usikkerhet i kostnads- og inntektsdata som er brukt i analysen.

Å innføre tidsdifferensierte priser vil være kontroversielt og mest sannsynlig møte stor politisk motstand. Arbeidstidene i Norge er relativt lite fleksible, det vil si at nedgangen i reiser i rushtid vil først og fremst bidra til økt trafikk i de andre transportsystemene. Veinettet i det sentrale Oslo-området er i dag overbelastet [13], og en reduksjon i antall togreiser i rushtid vil resultere i en økt belastning på veinettet. En av de store problemene med økt transportprising i rushtid i Oslo-området er at alle transportmetoder har svært høy belastning. Dersom reiser overføres fra ett transportsystem til et annet, vil problemet kun bli overført til det nye transportsystemet, i dette tilfellet veinettet. I tillegg kan det være en utfordring å implementere et tidsdifferensiert prissystem, særlig i forhold til reisende med månedskort og lignende.

Hovedmotivasjonen for å innføre et slikt system er at dagens system er urettferdig og lite samfunnsøkonomisk effektivt. Personer som reiser utenom rush betaler en uforholdsmessig høy pris, som krysssubsidierer reiser i rushtid. Tidsdifferensierte priser vil resultere i en økt samfunnsøkonomisk velferd, og flere togreisende. Det gir i tillegg et incentiv for passasjerene til å flytte reisen til et tidspunkt som er mer gunstig for operatørene, dersom dette lar seg gjøre.

Figur 5.1 viser hvordan reisemønsteret forandres med tidsdifferensierte priser ifølge analysen i denne rapporten. For å kunne implementere tidsdifferensierte priser i Oslo-området må alle strekninger analyseres. Strekningen Oslo-Ski er mest sannsynlig ikke representativ for Oslo-området, den har svært store svingninger over døgnet. Det er derfor nærliggende å tro at forskjellen i marginalkostnad ikke vil variere like mye som i denne rapporten dersom Oslo-området sees under ett.



Figur 5.1: Figuren viser reiser før og etter prisdifferensiering for henholdsvis reiser ut av Oslo (venstre) og inn til Oslo (høyre)

Elektrisk jernbane er den mest energieffektive transportmiddelet for personer [10]. For eksempel kreves det 2,3 ganger mer energi ved bruk av bensindrevne personbiler [10]. For godstrafikk er elektrisk- og dieseldrevet tog mest energi- og utslippseffektive transportmåtene [10]. Det er derfor miljømessig mest gunstig med en høy kapasitetsutnyttelse av jernbanen. Dynamisk ruteplanlegging er et godt tiltak for å øke andelen gods fraktet på jernbane. Dynamisk ruteplanlegging kan baseres på systemet til Deutsche Bahn, men kan ikke overføres direkte. I Norge betaler ikke operatørene for å bruke linjene og det er færre tilgjengelige linjer. Det kan derfor være aktuelt å lage et system som tar utgangspunkt i tiden hver operatør bruker sporet, som fordeles eller selges av Jernbaneverket. Vedlikeholdstiltak kan bedre oppetiden til jernbanen, og det er også et potensiale for økt kapasitetsutnyttelse gjennom konvensjonelle metoder. Disse tiltakene kan bidra til en mer effektiv jernbane med flere reisende.

Energikilden avgjør hvorvidt et tog er et miljøvennlig transportalternativ [4]. Elektriske tog vil resultere i svært lite forurensning dersom energien er produsert fra ikke-forurensende kilder, slik som vannkraft. I Norge er omtrent 99% av den elektriske kraften produsert av vannkraft [21]. Dersom det kjøres flere tog, vil dette øke kraftbehovet i Norge, noe som fører til økt kraftimport. Den importerte kraften vil produseres av kraftverk som har mulighet til å øke produksjonen, dette gjelder fortrinnsvis kullkraft og gasskraft importert fra Danmark eller Tyskland. Det blir derfor mer komplisert å avgjøre de totale utslippene knyttet til et ekstra tog i Norge.

Kapittel 6

Konklusjon

Den mikroøkonomiske analysen i denne oppgaven viser at det er samfunnsøkonomisk optimalt å øke prisene i rushtid med 92 % og senke prisene utenom rush med 38 %. Resultatet viser at det totale antall reisende øker med i underkant av én prosent, men sannsynligvis ligger det et stort potensial i en grundigere analyse.

Innføring av tidsdifferensierte priser vil være svært politisk kontroversielt. Det er lite trolig at økte priser i rushtid vil aksepteres, siden mange reisende er avhengig av togtransport i rushtid, og at dette vil øke belastningen på veinettet. Formålet med analysen er å belyse at operatørens marginalkostnad varierer kraftig i løpet av døgnet, slik at tidsdifferensierte priser vil gi en mer rettferdig og samfunnsøkonomisk effektivt jernbane, med flere reisende. På grunn av den politiske motstanden vil det være mer hensiktsmessig at eventuelle økte bevilgninger til jernbanesektoren bidrar til å redusere prisene utenom rush, fremfor å bidra til en generell prisreduksjon.

Det ligger også et potensiale i forbedret kapasitetsutnyttelse i tradisjonelle metoder, vedlikehold og dynamisk ruteplanlegging. Ved bruk av tradisjonelle metoder kan endret hastighet og eventuelt fjerning av stoppesteder bidra til økt frekvens for persontrafikken. Vedlikehold er nært knyttet til oppetiden til jernbanen, og kan bidra til høyere punktlighet. Dynamisk ruteplanlegging er et effektivt virkemiddel først og fremst for økt godstrafikk. Økt kapasitetsutnyttelse vil bidra til mer gods- og persontrafikk, som igjen vil bidra til en reduksjon av utslipp i klimagasser og lokal forurensning.

Kapittel 7

Videre arbeid

For å kunne implementere en korrekt prisdifferensiering bør operatørens reelle kostnads- og inntektsdata legges til grunn. Analysen bør omfatte hele Oslo-området, fremfor en enkeltstrekning slik som i denne rapporten. Videre bør ruteplanen tilpasses de nye prisene, som vil påvirke marginalkostnadene. Dette vil føre til et nytt samfunnsøkonomisk optimum, og dette bør repeteres iterativt inntil en likevekt er funnet.

Det bør videre utarbeides et forslag til hvordan operatørene kan få tildelt ekstra rutetid. Eksempelvis kan tildelingen skje ved hjelp av tidskvoter eller et åpent marked, der ekstra rutetid kjøpes og selges.

Videre bør det utvikles gode metoder for innsamling og behandling data knyttet til vedlikehold, slik at denne kan legge et grunnlag for optimaliseringen av det forebyggende vedlikeholdet.

Bibliografi

- [1] ISO 13372:2004. *Condition monitoring and diagnostics of machines - Vocabulary*. 2004.
- [2] <http://www.jernbaneverket.no/no/Marked/Informasjon-for-togselskapa/Grafiske-togruter-fom-11desember-2011/>. *Internettside*. 2012.
- [3] <http://www.nsb.no/rutetider/last-ned-rutetabeller-article37627-4325.html>. *Internettside*. 2012.
- [4] <http://samferdsel.toi.no/article19112-985.html>. *Internettside*. 2012.
- [5] DB Netz AG. *Trassenportal Kundenhandbuch*. Tek. rap. 2009.
- [6] Ole Meland og Per Schjølberg og Jørn Vatn og Harald Røseth. *Forskning og utvikling innen vedlikehold med relevans for petroleumsvirksomheten*. Tek. rap. SINTEF Teknologi og samfunn, 2009.
- [7] <http://snl.no/Østfoldbanen>. *Internettside*. 2012.
- [8] <https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Vedlikehold/Skinner>. *Internettside*. 2012.
- [9] <http://www.oppegard.kommune.no/Oppegaard/eSite.nsf/pub/RBFR6VXDFB?Open>. *Internettside*. 2012.
- [10] <http://www.ssb.no>. *Internettside*. 2012.
- [11] Transportøkonomisk Institutt. *Etterspørselseffekter på kort og lang sikt: en litteraturstudie i etterspørselsdynamikk*. Tek. rap. 2005.
- [12] Transportøkonomisk Institutt. *Optimale tilskudd til kollektivtrafikk i byområder*. Tek. rap. 2006.
- [13] Jernbaneverket. *Fakta om Follobanen (Oslo-Ski)*. Tek. rap. 2008.
- [14] Jernbaneverket. *Metodehåndbok JD 205 Samfunnsøkonomiske analyser for jernbanen*. Tek. rap. 2011.
- [15] Hans Svee og John O. Grinde. “Vedlikehold av jernbanenettet”. I: Jernbaneverket. Quality Hotel Airport Værnes, Stjørdal.
- [16] <http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Jernbanedrift-eit-komplisert-samspel/>. *Internettside*. 2012.
- [17] Yosef Sheffi. *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Prentice-Hall, Inc., 1985.
- [18] *Slik fungerer jernbanen*. Jernbaneverket, 2011.
- [19] Jørn Vatn. “Data drevet vedlikeholdsplanlegging med eksempler fra Jernbaneverket”. I: NTNU og Jernbaneverket. Rica Nidelven, Trondheim, 2011.
- [20] Johan Olsson & Mads Veiseth. *Jernbanetraffikk*. Tapir Forlag Trondheim, 2011.

- [21] Ivar Wangensteen. *Power System Economics - the Nordic Electricity Market*. Andre utgave. Tapir Academic Press, 2012.

Tillegg A

Tall Oslo-Ski

Tabellen viser reiselengder og antall avganger som inkluderer strekningen Oslo-Ski, basert på [3] og [2]. Det grønne tallet utgjør den vektede andelen av en rute som Oslo-Ski utgjør.

| | Lengde /km | Avganger ut av Oslo | Avganger inn til Oslo | Andel avganger | Andel Oslo-Ski | Vektet andel Oslo-Ski |
|------------------|---------------|------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|
| Oslo-Halden | 136,64 | 18 | 18 | 16,5 % | 17,8 % | 2,9 % |
| Oslo-Gøteborg* | 328,64 | 3 | 3 | 2,8 % | 7,4 % | 0,2 % |
| Oslo-Ski | 24,31 | 3 | 3 | 2,8 % | 100,0 % | 2,8 % |
| Skøyen-Ski | 28,69 | 42 | 42 | 38,5 % | 84,7 % | 32,6 % |
| Oslo-Moss | 60,16 | 4 | 1 | 2,3 % | 40,4 % | 0,9 % |
| Spikkestad-Moss | 97,26 | 19 | 19 | 17,4 % | 25,0 % | 4,4 % |
| Skøyen-Moss | 64,54 | 0 | 3 | 1,4 % | 37,7 % | 0,5 % |
| Skøyen-Mysen | 43,85 | 17 | 16 | 15,1 % | 55,4 % | 8,4 % |
| Oslo-Rakkestad | 54,31 | 1 | 0 | 0,5 % | 44,8 % | 0,2 % |
| Skøyen-Rakkestad | 58,69 | 1 | 4 | 2,3 % | 41,4 % | 1,0 % |
| Oslo-Mysen | 39,47 | 0 | 1 | 0,5 % | 61,6 % | 0,3 % |
| Sum | | 108 | 110 | | | 54,2 % |

*Strekningen Halden-Gøteborg er tilnærmet ved hjelp av <http://maps.google.com>

Tillegg B

MATLAB-kode

Matlab-kode til utregninger i kapittel 4.4.

```
% Data:
Pass      = [21 0 0 0 0 204 1557 3401 2164 735 306 362 345 363 385 597 ...
             446 452 216 200 156 158 81 46;
             327 104 0 0 0 9 165 427 265 238 187 245 340 284 612 2053 ...
             2728 1768 853 646 574 430 320 162];
           % rad 1 = inn, rad 2 = ut av Oslo

Tog       = [2 0 0 0 0 4 7 10 6 4 3 5 5 4 5 5 5 4 3 4 3 4 2 4;
             3 2 0 0 0 1 5 6 5 5 5 6 5 5 5 9 9 6 4 4 2 4 2 4];
           % rad 1 = inn, rad 2 = ut av Oslo

TogPass   = Pass./Tog;                % ant passasjerer per tog hver vei
KapTog    = zeros(1,max(sum(Tog)));    % ant passasjerer per tog over et døgn
Turer    = zeros(1,max(sum(Tog)));    % ant turer hvert tog har ila et døgn

for t = 1 : 24                          % loop gjennom timene i døgnet
    [maxPass maxTog] = max(TogPass(:,t));
    [minPass minTog] = min(TogPass(:,t));
    [minAnt minAntTog] = min(Tog(:,t));
    [maxAnt maxAntTog] = max(Tog(:,t));

    % Fordeling av passasjerer på marginale tog:
    for tog = 1 : 2 : 2*minAnt           % øvre grense alltid partall
        KapTog(tog) = KapTog(tog) + maxPass;
        Turer(tog) = Turer(tog) + 1;
        KapTog(tog + 1) = KapTog(tog + 1) + minPass;
        Turer(tog + 1) = Turer(tog + 1) + 1;
```

```

end
for tog = 2*minAnt + 1 : maxAnt + minAnt
    KapTog(tog) = KapTog(tog) + TogPass(maxAntTog, t);
    Turer(tog) = Turer(tog) + 1;
end
end

x = 1 : max(sum(Tog));
koeff = polyfit(x, KapTog, 1); % lineær regresjon

% Utregning av marginalkostnader:
n_tog = max(sum(Tog)); % Totalt antall tog
K_m = zeros(1, n_tog); % materiellkostnad per døgn
K_m(1:floor(2*n_tog/3)) = 8390;
K_m(floor(2*n_tog/3) + 1 : end) = 11986;
K_tur = 480.61 + 927.31; % kostnad per tur Oslo-Ski

regPas = zeros(1, n_tog); % marginalt ant passasjer ifølge regresjon
totPas = zeros(1, n_tog); % antall antall passasjerer for tog
kost = zeros(1, n_tog); % marginalkostnad for ett tog
PasKost = zeros(1, n_tog); % marginalkostnad for en passasjer
K_f = zeros(1, n_tog); % forsinkelseskostnad per tog
for tog = 1 : n_tog
    regPas(tog) = koeff(1) * tog + koeff(2);
    K_f(tog) = (0.094243 * tog + 0.07012) / 60 * 1.3 * (800 + 762);
    if tog > 1
        MK_f = sum(Turer(1:tog)) * K_f(tog) - sum(Turer(1:tog-1)) * K_f(tog - 1);
        % marginal forsinkelseskostnad
    else
        MK_f = Turer(tog) * K_f(tog);
    end
    end
    kost(tog) = MK_f + K_tur * Turer(tog) + K_m(tog);
    PasKost(tog) = kost(tog) / regPas(tog);
    totPas(tog) = sum(regPas);
end
end
plot(totPas, PasKost);

```

Tillegg C

Forskinkelsesdata

| | |
|---|--------------------------|
| Fra dato: 01.01.2012 | Til dato: 15.03.2012 |
| Tidsintervall: Dag | Forskinkelsesgrense: 4 |
| 2702,2704,2706,2708,2710,2712,2714,2716,2718,2720 | |
| Avg. stasjon (avg): Ski | Ank. stasjon (ank): Oslo |
| 2703,2705,2707,2709,2711,2713,2801,2715,2717,2719 | |
| Avg. stasjon (avg): Oslo S | Ank. stasjon (ank): Ski |

| Ankomst | Ti | Ti | Ti | Ti | Ti | Ti | Ti | Ti | Ti | Ti | |
|------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Tognummer | 3 | 10 | 17 | 24 | 31 | 7 | 14 | 21 | 28 | 6 | 13 |
| 2702 | 2 | 3 | -1 | 12 | 6 | -1 | -1 | -1 | -2 | -2 | -2 |
| 2704 | -2 | 1 | -1 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | -2 | -1 | 0 |
| 2706 | 0 | 0 | -1 | 15 | 0 | -2 | 0 | -2 | -1 | -1 | 2 |
| 2708 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 18 | 2 | -1 | 1 |
| 2710 | 0 | 2 | 5 | 2 | 0 | 0 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 2712 | 7 | 5 | 2 | 1 | 2 | 7 | 4 | 0 | 2 | 1 | -1 |
| 2714 | 2 | 3 | 1 | 0 | 3 | 0 | 3 | -1 | 2 | 0 | 2 |
| 2716 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | -1 | -1 | 3 | -1 | 8 |
| 2718 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0 | 8 |
| 2720 | 1 | 1 | 0 | -1 | -2 | -1 | 0 | 0 | -1 | -1 | -2 |
| 2722 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | -2 | -1 | 1 | 0 |
| 2724 | 0 | 1 | 7 | 0 | -1 | 1 | 0 | -1 | 3 | -1 | 0 |
| 2726 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | -2 |
| 2728 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | -1 | 2 | 0 | -2 |
| 2730 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | -1 | 0 | -2 | -1 | -1 | 0 |
| 2732 | 2 | -2 | 2 | -1 | -2 | 2 | -1 | -3 | -1 | -2 | -1 |
| 2734 | -1 | -2 | -1 | -1 | 0 | -1 | -2 | -1 | -2 | -1 | 1 |
| 2736 | -2 | -1 | 0 | -1 | -1 | -1 | -2 | -1 | 1 | -2 | -1 |
| 2738 | -1 | -1 | -1 | 5 | 0 | 1 | -1 | -1 | -2 | -2 | -2 |
| 2740 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 5 | -1 | 1 | 13 | 0 | -1 |
| 2742 | 1 | -1 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | -1 | 6 | -1 |
| 2744 | 1 | 0 | 1 | -1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| 2746 | 0 | 1 | 2 | -1 | 2 | 8 | 0 | -2 | 0 | -2 | -1 |
| 2748 | 1 | 7 | 0 | 1 | 2 | -2 | -1 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| 2750 | -1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 2 | -2 | -1 | 0 | 0 | -1 |
| 2752 | -1 | 4 | 2 | 0 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 5 |
| 2754 | 2 | 1 | -2 | 0 | 0 | -2 | -1 | -1 | 0 | -2 | -1 |
| 2756 | -1 | 0 | -1 | 4 | 2 | -2 | 0 | 1 | 4 | -1 | -1 |
| 2758 | -2 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0 | -2 | -1 | -1 | 0 | 1 |
| 2760 | 0 | -2 | -1 | 0 | -2 | -2 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2762 | 0 | 0 | -2 | -2 | -1 | -2 | 0 | -1 | -1 | -2 | 1 |
| 2764 | -2 | 5 | -2 | -1 | -1 | -2 | -1 | 0 | -2 | -2 | -1 |
| 2766 | -1 | 2 | 0 | -1 | -2 | 1 | -1 | -2 | 1 | -2 | -2 |
| 2768 | -2 | -2 | -1 | -2 | -2 | -2 | -1 | 0 | -2 | -2 | -2 |
| 2770 | -2 | -2 | -2 | 0 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | 0 | -1 |
| 2774 | 1 | -1 | 0 | -2 | -2 | -1 | -2 | 0 | 0 | 0 | -2 |
| 2778 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | -1 |
| 2802 | -3 | -2 | -2 | 1 | -2 | -1 | -3 | 6 | -3 | -2 | -2 |
| 2806 | -2 | -1 | -1 | -2 | 2 | 1 | -2 | -3 | -2 | -2 | -3 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| 2808 | 1 | 0 | -2 | -1 | -1 | -1 | -1 | -3 | -1 | -1 | -2 |
| 2810 | 0 | 1 | -1 | -1 | 2 | 3 | -1 | -2 | 0 | -2 | 3 |
| 2703 | 0 | 1 | 0 | 11 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| 2705 | -1 | 0 | 3 | -1 | -1 | -1 | 5 | -1 | 0 | -1 | 4 |
| 2707 | 1 | 0 | 2 | -1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | -1 | -2 |
| 2709 | 1 | -1 | 2 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 2711 | 1 | 2 | 5 | 4 | 1 | 2 | 0 | 4 | 8 | 0 | 2 |
| 2713 | 0 | 1 | 5 | 0 | 2 | -1 | -1 | 0 | 9 | -1 | 4 |
| 2715 | 2 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 3 | -1 | 4 |
| 2717 | 5 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | -1 | -1 | 0 | -1 |
| 2719 | 1 | 0 | 9 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2721 | 0 | -1 | 2 | 2 | 0 | -1 | -2 | 1 | -1 | -1 | 6 |
| 2723 | -1 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | 0 | 2 | 0 | 1 | -1 |
| 2725 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 5 | -1 | -1 |
| 2727 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 2 | 3 | -1 | 0 | 0 | -1 |
| 2729 | 0 | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 |
| 2731 | -8 | 0 | 0 | -1 | -1 | 2 | -1 | 1 | -1 | 5 | 0 |
| 2733 | 0 | -1 | -1 | -2 | -1 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | -1 |
| 2735 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 21 | 2 | 2 |
| 2737 | 2 | 0 | 1 | -1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 4 | 1 | -1 |
| 2739 | 1 | 2 | 0 | 0 | 3 | 5 | 4 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 2741 | 4 | 0 | 0 | -1 | 0 | 3 | -1 | -1 | 0 | 1 | 0 |
| 2743 | 1 | 18 | 3 | 2 | 3 | 5 | 2 | 2 | 5 | 3 | 2 |
| 2745 | 0 | 8 | 7 | 7 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 |
| 2747 | 3 | 3 | 6 | 1 | 5 | 7 | 3 | 2 | 5 | 2 | 4 |
| 2749 | 3 | 9 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | -2 | 3 | -1 | 1 |
| 2751 | 4 | 3 | 2 | 15 | 3 | 12 | 5 | 3 | 5 | 1 | 2 |
| 2753 | 1 | 0 | 1 | 3 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| 2755 | 1 | 2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 2757 | 2 | 1 | 0 | 7 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 2759 | -1 | 2 | -1 | 0 | 2 | -1 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 2761 | 2 | 1 | 1 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 2 |
| 2763 | 0 | 0 | 2 | -1 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | -1 |
| 2765 | 0 | 0 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0 | -1 | -1 |
| 2767 | -1 | 11 | 1 | -1 | -1 | 0 | -1 | -1 | 0 | -1 | 0 |
| 2769 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | 1 | -1 | -3 | 0 | 1 | -1 |
| 2771 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | 7 | -1 |
| 2773 | -1 | 3 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | -1 | -1 |
| 2775 | -1 | 4 | 0 | -1 | 4 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | -1 |
| 2779 | 2 | 4 | -1 | 2 | -1 | 3 | -1 | -1 | -1 | 0 | -1 |
| 2781 | -1 | 7 | 0 | 0 | -1 | -1 | 1 | 0 | -1 | -1 | -1 |
| 2803 | -1 | 1 | 0 | -1 | -2 | -2 | -1 | 0 | -2 | -2 | |
| 2805 | -2 | 17 | -2 | -1 | -1 | -2 | -2 | -2 | -1 | -2 | 0 |
| 2807 | 3 | 1 | 0 | 2 | 1 | 5 | 1 | | -1 | -1 | -1 |
| 2809 | -2 | -1 | 0 | 0 | 14 | 3 | -2 | -2 | -1 | -2 | 9 |
| Sum | 66 | 148 | 86 | 108 | 78 | 98 | 46 | 52 | 116 | 40 | 82 |
| Gjsn. | 95 | 85 | 92 | 89 | 95 | 90 | 94 | 96 | 88 | 96 | 89 |