UNIVERSITETET I OSLO
Institutt for informatikk

RusC og Rask

Kompendium til
INF2100

Stein Krogdahl

Dag Langmyhr

Høsten 2009

Innhold

Figurer

Tabeller

Forord

Dette kompendiet er laget for emnet *INF2100 – Prosjektoppgave i programmering*. Selve kurset er et av de eldste ved Ifi, men innholdet har allikevel blitt fornyet jevnlig.

Det opprinnelige kurset ble utviklet av *Stein Krogdahl* rundt 1980 og dreide seg om å skrive en kompilator som oversatte det Simula-lignende språket *Minila* til kode for en tenkt datamaskin *Flink*; implementasjonsspråket var Simula. I 1999 gikk man over til å bruke Java som implementasjonsspråk, og i 2007 ble kurset fullstendig renovert av *Dag Langmyhr*: Minila ble erstattet av en minimal variant av C kalt *RusC* og datamaskinen Flink ble avløst av *Rask*.

Forfatterne vil ellers takke studenten *Bendik Rønning Opstad* for verdifulle innspill om forbedringer av dette kompendiet.

Blindern, 16. august 2009

Stein Krogdahl *Dag Langmyhr*

Teori er når ingenting virker og alle vet hvorfor. Praksis er når allting virker og ingen vet hvorfor.

I dette kurset kombineres teori og praksis – ingenting virker og ingen vet hvorfor.

— Forfatterne

Kapittel 1

Innledning

1.1 Hva er kurset INF2100?

Emnet INF2100 har betegnelsen *Prosjektoppgave i programmering*, og hovedideen med dette emnet er å ta med studentene på et så stort programmeringsprosjekt som mulig innen rammen av de ti studiepoeng kurset har. Grunnen til at vi satser på ett stort program er at de fleste ting som har å gjøre med strukturering av programmer, oppdeling i moduler etc, ikke oppleves som meningsfylte eller viktige før programmene får en viss størrelse og kompleksitet. Det som sies om slike ting i begynnerkurs får lett preg av litt livsfjern «programmeringsmoral» fordi man ikke ser behovet for denne måten å tenke på i de små oppgavene man vanligvis rekker å gå gjennom.

Ellers er programmering noe man trenger trening for å bli sikker i. Dette kurset vil derfor ikke innføre så mange nye begreper omkring programmering, men i stedet forsøke å befeste det man allerede har lært, og demonstrere hvordan det kan brukes i forskjellige sammenhenger.

«Det store programmet» som skal lages i løpet av INF2100 er en **kompilator**. En kompilator oversetter fra ett datamaskinspråk til et annet, vanligvis fra et såkalt **høynivå programmeringsspråk** til et **maskinspråk** som datamaskinens elektronikk kan utføre direkte. Nedenfor skal vi se litt på hva en kompilator er og hvorfor det å lage en kompilator er valgt som tema for oppgaven.

Selv om vi konsentrerer dette kurset omkring ett større program vil ikke dette kunne bli noe virkelig *stort* program. Ute i den «virkelige» verden blir programmer fort vekk på flere hundre tusen eller endog millioner linjer, og det er først når man skal i gang med å skrive, og ikke minst senere gjøre endringer i, slike programmer, at strukturen av programmene blir helt avgjørende. Det programmet vi skal lage i dette kurset vil typisk bli på et par–tre tusen linjer.

I dette kompendiet beskrives stort sett bare selve programmerings-oppgaven som skal løses. I tillegg til dette kan det komme ytterligere krav, for eksempel angående bruk av verktøy eller skriftlige arbeider som skal leveres. Dette vil i så fall bli opplyst om på forelesningene og på kursets hjemmeside.

1.2 Hvorfor oppgaven er å lage en kompilator

Når det skulle velges «tema» for en programmeringsoppgave til dette kurset var det først og fremst to kriterier som var viktige:

- Oppgaven må være overkommelig å programmere innen kursets ti studiepoeng.
- Programmet må angå en problemstilling som studentene kjenner, slik at det ikke går bort verdifull tid til å forstå hensikten med programmet og dets omgivelser.

I tillegg til dette kan man ønske seg et par ting til:

- Det å lage et program innen et visst anvendelsesområde gir vanligvis også bedre forståelse av området selv. Det er derfor også ønskelig at anvendelsesområdet er hentet fra databehandling slik at denne bieffekten gir øket forståelse av faget selv.
- Problemområdet bør ha så mange interessante variasjoner at det kan være en god kilde til øvelsesoppgaver som kan belyse hovedproblemstillingen.

Utfra disse kriterier synes ett felt å peke seg ut som spesielt fristende, nemlig det å skrive en kompilator, altså skrive et program som oppfører seg omtrent som for eksempel en Java-kompilator eller en C-kompilator. Dette er en type verktøy som alle som har arbeidet med programmering har vært borti, og som det også er verdifullt for de fleste å lære litt mer om.

Det å skrive en kompilator vil også for de fleste i utgangspunktet virke som en stor og uoversiktlig oppgave. Noe av poenget med kurset er å demonstrere at med en hensiktsmessig oppdeling av programmet i deler som hver tar ansvaret for en avgrenset del av oppgaven, så kan både de enkelte deler og den helheten de danner bli høyst medgjørlig. Det er denne erfaringen, og forståelsen av hvordan slik oppdeling kan gjøres på et reelt eksempel, som er det viktigste studentene skal få med seg fra dette kurset.

Vi skal i neste avsnitt se litt mer på hva en kompilator er og hvordan den står i forhold til liknende verktøy. Det vil da også raskt bli klart at det å skrive en kompilator for et «ekte» programmeringsspråk som skal oversette til maskinspråket til en «ekte» datamaskin vil bli en alt for omfattende oppgave. Vi skal derfor forenkle oppgaven en del, for eksempel ved å lage vårt eget lille programmeringsspråk *RusC* og ved å definere vår egen maskin *Rask* hvis maskinspråk kompilatoren skal oversette til. Vi skal i det følgende se litt nærmere på disse og andre elementer som inngår i oppgaven.

1.3 Litt om kompilatorer og liknende verktøy

De fleste som starter på kurset INF2100 har neppe full oversikt av hva en kompilator er og hvilken funksjon den har i forbindelse med et programmeringsspråk. Dette vil forhåpentligvis bli mye klarere i løpet av dette kurset, men for å sette scenen skal vi gi en kort forklaring her.

Grunnen til at man i det hele tatt har kompilatorer er at det er høyst upraktisk å bygge datamaskiner slik at de direkte ut fra sin elektronikk kan utføre et program skrevet i et høynivå programmeringsspråk som for eksempel Java, C, C++ eller Perl. I stedet er datamaskiner bygget slik at de kan utføre et begrenset repertoar av nokså enkle instruksjoner (og det blir derved en overkommelig oppgave å lage elektronikk som kan utføre disse). Til gjengjeld kan datamaskiner raskt utføre lange sekvenser av slike instruksjoner, grovt sett med en hastighet av 1000–3000 millioner instruksjoner per sekund.

For å kunne få utført programmer som er skrevet for eksempel i Java, lages det derfor programmer som kan *oversette* et Java-program til en tilsvarende sekvens av maskininstruksjoner for en gitt maskin. Det er slike oversettelsesprogrammer som kalles kompilatorer. En kompilator er altså et helt vanlig program som leser data inn, og som leverer data fra seg. Dataene det leser inn er et tekstlig program (i det programmeringsspråket denne kompilatoren skal oversette fra), og det den leverer fra seg er en sekvens av maskininstruksjoner for den aktuelle maskinen. Disse maskininstruksjonene vil kompilatoren vanligvis legge på en fil i et passelig format med tanke på at de senere kan kopieres inn i en maskin og bli utført.

Det settet med instruskjoner som en datamaskin kan utføre direkte i elektronikken, kalles maskinens **maskinspråk**, og programmer i dette språket kalles *maskinprogrammer* eller *maskinkode*.

En kompilator må også sjekke at det programmet den får inn overholder alle reglene for det aktuelle programmeringsspråket. Om dette ikke er tilfelle, må det gis feilmeldinger, og da lages det som regel heller ikke noe maskinprogram.

For å få begrepet *kompilator* i perspektiv skal vi se litt på et par alternative måter å ordne seg på, og hvordan disse skiller seg fra tradisjonelle kompilatorer.

1.3.1 Preprosessorer

I stedet for å kompilere til en sekvens av maskininstruksjoner finnes det også noen kompilatorer som oversetter til et annet programmeringsspråk på samme «nivå». For eksempel kunne man tenke seg å oversette fra Java til C++, for så å la en C++-kompilator oversette det videre til maskinkode. Vi sier da gjerne at denne Java-«kompilatoren» er en **preprosessor** til C++-kompilatoren.

Mer vanlig er det å velge denne løsningen dersom man i utgangspunktet vil bruke et bestemt programmeringsspråk, men ønsker noen spesielle utvidelser, enten på grunn av en bestemt oppgave eller fordi man tror det kan gi språket nye generelle muligheter. En preprosessor behøver da bare ta tak i de spesielle utvidelsene, og oversette disse til konstruksjoner i grunnutgaven av språket.

Et eksempel på et språk der de første kompilatorene ble laget på denne måten, er C++. C++ var i utgangspunktet en utvidelse av språket C, og utvidelsen bestod i å legge til objektorienterte begreper (klasser, subklasser og objekter) hentet fra språket Simula. Denne utvidelsen ble i første

omgang implementert ved en preprosessor som oversatte alt til ren C. I dag er imidlertid de fleste kompilatorer for C++ skrevet som selvstendige kompilatorer som oversetter direkte til maskinkode.

En viktig ulempe ved å bruke en preprosessor er at det lett blir tull omkring feilmeldinger og tolkningen av disse. Siden det programmet preprosessoren leverer fra seg likevel skal gjennom en full kompilering etterpå, lar man vanligvis være å gjøre en full programsjekk i preprosessoren. Dermed kan den slippe gjennom feil som i andre omgang resulterer i feilmeldinger fra den avsluttende kompileringen. Problemet blir da at disse vanligvis ikke vil referere til linjenummerene i brukerens opprinnelige program, og de kan også på andre måter virke nokså uforståelige for vanlige brukere.

1.3.2 Interpretering

Det er også en annen måte å utføre et program skrevet i et passelig programmeringsspråk på, og den kalles **interpretering**. I stedet for å skrive en kompilator som kan oversette programmer i det aktuelle programmeringsspråket til maskinspråk, skriver man en såkalt **interpret**. Dette er et program som (i likhet med en kompilator) leser det aktuelle programmet linje for linje, men som i stedet for å produsere maskinkode rett og slett *gjør* det som programmet foreskriver skal gjøres.

Den store forskjellen blir da at en kompilator bare leser (og oversetter) hver linje én gang, mens en interpret må lese (og utføre) hver linje på nytt hver eneste gang den skal utføres for eksempel i en løkke. Interpretering går derfor generelt en del tregere under utførelsen, men man slipper å gjøre noen kompilering. En del språk er (eller var opprinnelig) siktet spesielt inn på interpretering, det gjelder for eksempel Basic og Lisp. Det finnes imidlertid nå kompilatorer også for disse språkene.

En type språk som nesten alltid blir interpretert, er kommandospråk til operativsystemer; et slikt eksempel er Bash.

Interpretering kan gi en del fordeler med hensyn på fleksibel og gjenbrukbar kode. For å utnytte styrkene i begge teknikkene, er det laget systemer som kombinerer interpretering og kompilering. Noe av koden kompileres helt, mens andre kodebiter oversettes til et mellomnivåspråk som er bedre egnet for interpretering – og som da intepreteres under kjøring. Smalltalk, Perl og Python er eksempler på språk som ofte er implementert slik.

Interpretering kan også gi fordeler med hensyn til portabilitet, og, som vi skal se under, er dette utnyttet i forbindelse med vanlig implementasjon av Java.

1.3.3 Kompilering og kjøring av Java-programmer

En av de opprinnelige ideene ved Java var knyttet til datanett ved at et program skulle kunne kompileres på én maskin for så å kunne sendes over nettet til en hvilken som helst annen maskin (for eksempel som en såkalt *applet*) og bli utført der. For å få til dette definerte man en tenkt datamaskin kalt *Java Virtual Machine* (JVM), og lot kompilatorene produsere maskinkode (gjerne kalt *byte-kode*) for denne maskinen. Det er imidlertid ingen datamaskin som har elektronikk for direkte å utføre

slik byte-kode, og maskinen der programmet skal utføres må derfor ha et program som simulerer JVM-maskinen og dens utføring av byte-kode. Vi kan da gjerne si at et slikt simuleringsprogram interpreterer maskinkoden til JVM-maskinen. I dag har for eksempel de fleste nettlesere (Firefox, Opera, Explorer og andre) innebygget en slik JVM-interpret for å kunne utføre Java-applets når de får disse (ferdig kompilert) over nettet.

Slik interpretering av maskinkode går imidlertid normalt en del saktere enn om man hadde oversatt til «ekte» maskinkode og kjørt den direkte på «hardware». Typisk kan dette for Javas byte-kode gå 1,2 til 2 ganger så sakte. Etter hvert som Java er blitt mer populært har det derfor også blitt behov for systemer som kjører Java-programmer raskere, og den vanligste måten å gjøre dette på er er å utstyre JVM-er med såkalt «Just-In-Time» (JIT)-kompilering. Dette vil si at man i stedet for å interpretere byte-koden, oversetter den videre til den aktuelle maskinkoden umiddelbart før programmet startes opp. Dette kan gjøres for hele programmer, eller for eksempel for klasse etter klasse etterhvert som de tas i bruk første gang.

Man kan selvfølgelig også oversette Java-programmer på mer tradisjonell måte direkte fra Java til maskinkode for en eller annen faktisk maskin, og slike kompilatorer finnes og kan gi meget rask kode. Om man bruker en slik kompilator, mister man imidlertid fordelen med at det kompilerte programmet kan kjøres på alle systemer.

1.3.4 Forholdene i vår RusC-kompilator

I den oppgaven som skal løses i INF2100 skal vi i utgangspunktet lage en tradisjonell kompilator for språket *RusC*. Det å oversette til maskinkoden for en ekte maskin ville imidlertid føre for langt, og vi har derfor definert en litt enklere maskin kalt *Rask*; vi kommer tilbake til denne senere. For å kunne utføre programmer i Rask-kode må vi derfor ha et program som simulerer denne maskinen, altså en Rask-interpret.

Vi er altså på mange måter i samme situsjon som for tradisjonell Java (der vår Rask tilsvarer Javas JVM), men merk at begrunnelsene for en slik måte å gjøre det på er forskjellige: For JVM var begrunnelsen at man ønsket å kunne kjøre alle kompilerte Java-programmer på alle maskiner (portabilitet), mens vår begrunnelse for å definere maskinen Rask i INF2100 er å få en enkel datamaskin.

1.4 Språkene i oppgaven

I løpet av dette prosjektet må vi forholde oss til flere språk.

1.4.1 Programmeringsspråket RusC

Det å lage en kompilator for til dømes Java ville fullstendig sprenge kursrammen på ti studiepoeng. I stedet har vi laget et språk spesielt for dette kurset med tanke på at det skal være overkommelig å oversette. Dette språket er kalt *RusC*. Selv om dette språket er enkelt, er det lagt vekt på at man skal kunne uttrykke seg rimelig fritt i det, og at «avstanden» opp til mer realistiske programmeringsspråk ikke skal virke uoverkommelig. Språket RusC blir beskrevet i detalj i kapittel 2 på side 23.

1.4.2 Datamaskinen Rask og dens maskinspråk

Det en kompilator oversetter til, er vanligvis maskinspråket på den aktuelle maskin. Å forstå hovedideene for maskinspråket, for eksempel for en PowerPC- eller en Intel Pentium-maskin, ville ikke være veldig problematisk, men å bruke det som språk å oversette RusC til ville trekke med seg så mange detaljer at det ville bli uoverkommelig i et opplegg som dette.

For å få et språk å oversette til som er enkelt nok, og for samtidig å beholde et rimelig nært forhold til vanlige kompilatorer, vil vi altså her definere en egen forenklet datamaskin. Den vil ha en del typiske trekk fra vanlige datamaskiner, og vil gi en ganske god følelse for hvordan en datamaskin og dens maskinspråk vanligvis er utformet. En del detaljer er imidlertid fjernet.

Denne maskinen, med sitt maskinspråk og sine maskininstruksjoner er kalt *Rask*. Rask er en meget enkel maskin og kan for eksempel bare regne med heltall. Maskinen Rask er beskrevet i kapittel 3 på side 33.

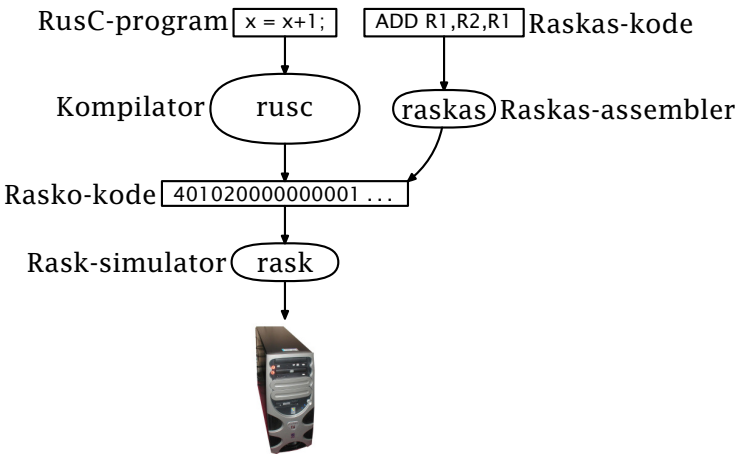
Det finnes altså ingen maskin som direkte – det vil si ved hjelp av elektronikk – kan utføre maskinspråket til Rask. At en slik maskin finnes er imidlertid den tenkte forutsetningen for den kompilatoren vi skal lage. For at denne forutsetningen skal være så nær som mulig oppfylt er det laget ferdig et program som *simulerer* maskinen Rask, både med hensyn til indre arkitektur og med hensyn til evne til å utføre maskininstruksjoner. Dette programmet starter med å lese et Rask-program fra en angitt fil. På filen må Rask-programmet da ligge i et spesielt format som kalles **Rasko**; denne koden er forklart nærmere i avsnitt 3.4 på side 34.

Slik vi framstiller det her er alt som lagres i Rask-maskinen tall. Dette kan gi næring til den vrangforestilling at datamaskiner dypest sett bare kan behandle tall, så la oss derfor straks se på hva som er tilfellet i en virkelig maskin. Den elementære lagringsenheten her kan bare ha to tilstander, som gjerne er kalt *av* og *på* eller 0 og 1. En slik lagringsenhet kalles gjerne et **bit** (som er en forkortelse for *binary digit*), og sekvenser av slike bit kan brukes like godt til å representere bokstaver som til å representere tall, bilder, eller hva annet man måtte ha behov for ved bare å bli enig om en passelig koding. Bit grupperes gjerne åtte og åtte til såkalte **byte**, og en datamaskin kan typisk inneholde flere milliarder slike byte i sitt interne lager. I det eksterne lager (vanligvis et platelager) kan det tilsvarende være plass til størrelsesorden hundre milliarder byte.

Når vi her lar lagerenhetene i Rask inneholde tall, er det fordi det å bruke bit ville bli for komplisert, og fordi tall gir riktige assosiasjoner i hvertfall et stykke på vei. Tall er også greie å behandle i Java og andre programmeringsspråk.

1.4.3 Assembleren Raskas

Vanligvis når man programmerer en datamaskin, beskriver man det man vil ha gjort i et passelig høynivå programmeringsspråk. En kompilator sørger så, slik som beskrevet over, for å produsere en tilsvarende sekvens av maskininstruksjoner og å legge denne ut på en angitt fil. Denne kan så senere lastes inn i maskinen og utføres. Vår RusC-kompilator skal altså gjøre nettopp dette.



Figur 1.1: Sammenhengen mellom RusC, Raskas, Rasko og Rask

Man har imidlertid også av og til behov for å skrive programmer (eller deler av programmer) direkte som en sekvens av maskininstruksjoner. Dette behovet oppstår vanligvis fordi man vil ha programmet spesielt effektivt, eller man ønsker å gjøre noe som høynivåspråket ikke tillater. Vi skal også programmere litt direkte i Rasks maskinspråk i dette kurset, men det er bare for å lære Rask-maskinen ordentlig å kjenne.

Når man skal programmere direkte i maskininstruksjoner, er det svært tungt å bruke tallkoder hele tiden, slik det fremtrer i Rasko-koden, og så godt som alle maskiner har derfor laget en tekstkode som er lettere å huske enn et tall. For eksempel kan man bruke «ADD» for en instruksjon som legger sammen heltall i stedet for til dømes tallet 4, som kan være instruksjonens egentlige kode. Man lager så et enkelt program som oversetter sekvenser av slike tekstlige instruksjoner til utførbar maskinkode-form, og slike oversetterprogrammer kalles tradisjonelt **assemblere**. Det oppsett eller format man må bruke for å angi et maskinprogram til assembleren, kalles gjerne **assemblerspråket**.

Assembler-språket for Rask kalles **Raskas**. Det er skrevet ferdig en assembler for dette språket, og denne ligger på Ifis datamaskiner. Raskas-assembleren tar som input en fil med Raskas-kode og oversetter denne til Rask-instruksjoner som blir lagt ut på en angitt fil i Rasko-format.

For treningens skyld skal vi i kurset skrive en del programmer i Raskas. Det nøyaktige formatet for assemblerspråket er beskrevet i kapittel 4 på side 37. Raskas-assembleren er altså bare skrevet for lettere å kunne sette seg inn i Rasks virkemåte og for å kunne trene seg i bruk av den. Den vil ikke inngå som del av den ferdige kompilator som skal skrives. Forholdet mellom RusC-kompilatoren, Raskas-assembleren, Rasko-koden og den utførende Rask-maskinen kan beskrives ved figur 1.1.

Både et RusC-program, et Raskas-program og et Rasko-program er altså et tekstlig program som ligger på en fil. Slike filer kan leses av RusC-kompilatoren, Raskas-assembleren og maskinen Rask. De to førstnevnte er programmer som begge er oversettere som produserer Rasko-kode, mens den sistnevnte er en simulator av en tenkt maskin.

Raskas-assembleren er tegnet litt mindre enn RusC-kompilatoren for å markere at den oversetter en «kortere» avstand, altså at et Raskas-program ligger «nærmere» maskinkode enn for eksempel RusC gjør. Ja, et Raskas-program er jo bare en tekstlig form for å angi Rask-instruksjon for Rask-instruksjon, mens RusC-kompilatoren jo må «finne på» en fornuftig sekvens av Rask-instruksjoner som gjør det som er foreskrevet i RusC-programmet. Man sier derfor gjerne at RusC er **høynivåspråk** mens for eksempel Raskas-kode er et **lavnivåspråk**. Det er selvfølgelig her snakk om en kontinuerlig skala og Java er for eksempel vesentlig «høyere» enn RusC.

1.4.4 Oversikt over de ulike språkene i oppgaven

Det blir i begynnelsen mange programmeringsspråk å holde orden på før man blir kjent med dem og hvordan de forholder seg til hverandre. Det er altså fem språk med i bildet:

1) **Java**, som RusC-kompilatoren skal skrives i.
2) **RusC**, som kompilatoren skal oversette fra.
3) **Rasks maskinspråk**, som kompilatoren skal oversette til.
4) **Rasko-format**, som er et passelig tallformat for å lagre maskinprogrammer for Rask på fil.
5) **Raskas-kode** er en tekstlig form for maskininstruksjoner til Rask-maskinen. Raskas-assembleren kan oversette Raskas-koden til Rasko-kode.

I tillegg ligger altså maskinkoden til de aktuelle maskinene (som Pentium, PowerPC eller noe annet) under hele tiden, i og med at det er denne alt oversettes til før noe i det hele tatt kan utføres på disse maskinene. Hold tunga rett i munnen, og tenk litt på dette *hver kveld* så føler du deg snart hjemme i det hele!

1.5 Oppgaven og dens tre deler

Oppgaven skal løses i tre skritt, hvor alle er obligatoriske oppgaver. Som nevnt kan det utover dette komme krav om for eksempel verktøybruk eller levering av skriftlige arbeider, men også dette vil i så fall bli annonsert i god tid.

Hele programmet kan grovt regnet bli på fra tusen til tre tusen Java-linjer, alt avhengig av hvor tett man skriver. Erfaringsmessig er det del 1 som innebærer mest arbeid. Vi gir her en rask oversikt over hva de tre delene vil inneholde, men vi kommer fyldig tilbake til hver av dem på forelesningene og i senere kapitler.

1.5.1 Del 0

Første skritt, del 0, består i å få **skanneren** til å virke. Skanneren er den modulen som fjerner kommentarer fra programmet, og så deler den gjenstående teksten i en veldefinert sekvens av såkalte **symboler** (på engelsk «tokens»). Symbolene er de enhetene programmet er bygget opp

av, så som *navn*, *tall*, *nøkkelord*, '+', '>=', '=' og alle de andre tegn og tegnkombinasjoner som har en bestemt betydning i RusC-språket.

Denne «renskårene» sekvensen av symboler vil være det grunnlaget som resten av kompilatoren (del 1 og del 2) skal bruke til å arbeide videre med programmet. Mye av programmet til del 0 vil være ferdig laget eller skissert, og dette vil kunne hentes på angitt sted.

1.5.2 Del 1

Del 1 vil ta imot den symbolsekvensen som blir produsert av del 0, og det sentrale arbeidet her vil være å sjekke at denne sekvensen har den formen et riktig RusC-program skal ha (altså, at den følger **syntaksen** til RusC). Videre skal del 1 sjekke slike ting som at alle funksjoner og variabler er deklarert.

Om alt er i orden, skal del 1 bygge opp en **trestruktur** av objekter som direkte representerer det aktuelle RusC-programmet, altså hvordan det er satt sammen av «expression» inne i «statement» inne i «function body» osv. Denne trestrukturen skal så leveres videre til del 2 som grunnlag for generering av Rask-kode.

1.5.3 Del 2

I del-2 skal man gjøre selve oversettelsen til Rask-kode ved å ta utgangspunkt i den trestrukturen som del 1 produserte for det aktuelle RusC-programmet. Koden skal legges på en fil angitt av brukeren og den skal være i såkalt Rasko-format.

I kapittel 5 på side 43 er det angitt hvilke sekvenser av Rask-instruksjoner hver enkelt RusC-konstruksjon skal oversettes til, og det er viktig å merke seg at disse skjemaene *skal* følges (selv om det i enkelte tilfeller er mulig å produsere lurere Rask-kode; dette skal vi eventuelt se på i noen ukeoppgaver).

1.6 Programmering av lister, trær etc

Noe av hensikten med INF2100 er at man i størst mulig grad skal få en «hands on»-følelse med alle deler av programmeringen ned gjennom alle nivåer. Det er derfor et krav at gruppene selv programmerer all håndtering av lister og trær, og ikke bruker ferdiglagede bibliotekspakker og slikt til det. Med andre ord, det er ikke lov å importere andre Java-klasser enn `java.io.*`. Det er heller ikke tillat å benytte seg av Javas `StreamTokenizer` eller `StringTokenizer`.

For de som nettopp har tatt introduksjonskursene, kan dette kanskje være en utfordring, men vi skal bruke noe tid på gruppene til å se på dette, og ut fra eksempler, oppgaver, etc burde det da gå greit.

1.7 Krav til samarbeid og gruppetilhørighet

Normalt er det meningen at to personer skal samarbeide om å løse oppgaven. De som samarbeider bør være fra samme øvelsesgruppe på kurset. Man bør tidlig begynne å orientere seg for å finne én på gruppen å samarbeide med. Det er også lov å løse oppgaven alene, men dette vil selvfølgelig gi mer arbeid. Om man har en del programmeringserfaring, kan imidlertid dette være et overkommelig alternativ.

Hvis man får samarbeidsproblemer (som at den andre «har meldt seg ut» eller «har tatt all kontroll»), si ifra i tide til gruppelærer eller kursledelse så kan vi se om vi kan hjelpe dere å komme over «krisen». Slikt har skjedd før.

1.8 Kontroll av innlevert arbeid

For å ha en kontroll på at hvert arbeidslag har programmert og testet ut programmene på egen hånd, og at begge medlemmene har vært med i arbeidet, må studentene være forberedt på at gruppelæreren eller kursledelsen forlanger at studenter som har arbeidet sammen skal kunne redegjøre for oppgitte deler av den kompilatoren de har skrevet. Med litt støtte og hint skal de for eksempel kunne gjenskape deler av selve programmet på en tavle.

Slik kontroll vil bli foretatt på stikkprøvebasis samt i noen tilfeller der gruppelæreren har sett lite til studentene og dermed ikke har hatt kontroll underveis med studentenes arbeid.

Dessverre har vi tidligere avslørt fusk; derfor ser vi det nødvendig å holde slike overhøringer på slutten av kurset. Dette er altså ingen egentlig eksamen, bare en sjekk på at dere har gjort arbeidet selv. Noe ekstra arbeid for dem som blir innkalt blir det heller ikke. Når dere har programmert og testet ut programmet, kan dere kompilatoren deres forlengs, baklengs og med bind for øynene.

Et annet krav er at alle innleverte program er vesentlig ulikt alle andre innleveringer. Men om man virkelig gjør jobben selv, får man automatisk et unikt program.

Hvis noen er engstelige for hvor mye de kan samarbeide med andre utenfor sin gruppe, vil vi si:

- Ideer og teknikker kan diskuteres fritt.
- Programkode skal gruppene skrive selv.

Eller, sagt på en annen måte: Samarbeide er bra, men kopiering er galt!

Merk at *ingen godkjenning av enkeltdeler er endelig* før den avsluttende runde med slik muntlig kontroll, og denne blir antageligvis holdt en gang rundt begynnelsen av desember.

1.9 Delta på gruppene

Ellers vil vi oppfordre studentene til å være aktive på de ukentlige øvelsesgruppene. Oppgavene som blir gjennomgått, er stort sett meget relevante for skriving av RusC-kompilatoren. Om man tar en liten titt på oppgavene før gruppetimene vil man antageligvis få svært mye mer ut av gjennomgåelsen.

Selv om man ikke har forberedt seg er det imidlertid helt lov på gruppa å komme med et uartikulert:

> «Jeg forstår ikke hva dette har med saken å gjøre!»

Antageligvis føler da flere det på samme måten, så du gjør gruppa en tjeneste. Og om man synes man har en aha-opplevelse så er det fin støtte både for deg selv og andre om du sier:

> «Aha, det er altså ... som er poenget! Stemmer det?»

Siden det er mange nye begreper å komme inn i, er det viktig å begynne å jobbe med dem så tidlig som mulig i semesteret. Ved så å ta det fram i hodet og oppfriske det noen ganger, vil det neppe ta lang tid før begrepene begynner å komme på plass. Kompendiet sier ganske mye om hvordan oppgaven skal løses, men alle opplysninger om hver programbit står ikke nødvendigvis samlet på ett sted.

Til sist et råd fra tidligere studenter: *Start i tide!*

Kapittel 2

Programmeringsspråket RusC

Programmeringsspråket RusC er en slags miniversjon av C; navnet er et bakronym[1] for «Rudimentary simple C». Syntaksen er gitt av jernbanediagrammene i figur 2.2 til 2.25 på side 25 og utover og bør være lett forståelig for alle som har programmert litt i C. Et eksempel på et RusC-program er vist i figur 2.1 på neste side.[2]

2.1 Kjøring

Inntil dere selv har laget en RusC-kompilator, kan dere benytte referansekompilatoren:

```
> rusc primes.rusc
> rask primes.rask
   2   3   5   7  11  13  17  19  23  29
  31  37  41  43  47  53  59  61  67  71
  73  79  83  89  97 101 103 107 109 113
 127 131 137 139 149 151 157 163 167 173
 179 181 191 193 197 199 211 223 227 229
 233 239 241 251 257 263 269 271 277 281
 283 293 307 311 313 317 331 337 347 349
 353 359 367 373 379 383 389 397 401 409
 419 421 431 433 439 443 449 457 461 463
 467 479 487 491 499 503 509 521 523 541
 547 557 563 569 571 577 587 593 599 601
 607 613 617 619 631 641 643 647 653 659
 661 673 677 683 691 701 709 719 727 733
 739 743 751 757 761 769 773 787 797 809
 811 821 823 827 829 839 853 857 859 863
 877 881 883 887 907 911 919 929 937 941
 947 953 967 971 977 983 991 997
```

[1] Et *akronym* er en forkortelse som kan uttales som et vanlig ord og derfor ofte oppfattes som en eget ord; eksempler er AIDS («acquired immune deficiency syndrome»), NATO («North Atlantic treaty organization») og RADAR («radio detection and ranging»).

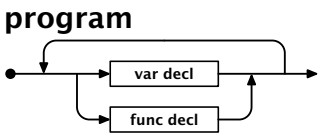
Et *bakronym* er et akronym der man starter med ordet og etterpå finner ut hva det skal være en forkortelse for; eksempler er programmeringsspråket PERL («Practical extraction and report language») og kommunikasjonsprotokollen TWAIN («Technology without an interesting name»).

[2] Du finner dette programmet og andre nyttige testprogrammer i mappen ~inf2100/oblig/test/ som også er tilgjengelig som http://www.ifi.uio.no/~inf2100/oblig/test/.

primes.rusc

```
/* Program 'primes'
   ----------------
   Finds all prime numbers up to 1000 (using the technique called
   "the sieve of Eratosthenes") and prints them nicely formatted.
*/

#include "/local/opt/inf2100/include/rusc.h"

int prime[1001];  /* The sieve */
int LF;           /* LF */

int find_primes ()
{
   /* Remove all non-primes from the sieve: */

   int i1;  int i2;

   for (i1 = 2;  i1 <= 1000;  i1 = i1+1) {
      for (i2 = 2*i1;  i2 <= 1000;  i2 = i2+i1) {
         prime[i2] = 0;
      }
   }
}

int mod (int a, int b)
{
   /* Computes a%b. */

   int ax;

   ax = a/b;  ax = ax*b;
   return a - ax;
}

int p3 (int v)
{
   /* Does a 'printf("%3d", v)´;
      assumes 0<=v<=999. */

   if (v <= 9) {
      putchar(' ');   putchar(' ');
   } else {
      if (v <= 99) {
         putchar(' ');
      };
   }
   putint(v);
}

int print_primes ()
{
   /* Print the primes, 10 on each line. */

   int n_printed;  int i;

   n_printed = 0;
   for (i = 1;  i <= 1000;  i = i + 1) {
      if (prime[i]) {
         if (mod(n_printed,10) == 0 * n_printed) {
            putchar(LF);
         }
         putchar(' ');   p3(i);   n_printed = n_printed+1;
      }
   }
   putchar(LF);
}

int main ()
{
   int i;

   LF = 10;
   /* Initialize the sieve by assuming all numbers >1 to be primes: */
   prime[1] = 0;
   for (i=2; i<=1000; i=i+1) { prime[i] = 1; }

   /* Find and print the primes: */
   find_primes();  print_primes();
}
```

Figur 2.1: Eksempel på et RusC-program



Figur 2.2: Jernbanediagram for ⟨program⟩

2.1.1 Kompilering med C-kompilatoren

Siden RusC er en nesten ekte undermengde av C, kan man bruke C-kompilatoren til å lage kjørbar kode. Det eneste man må sørge for, er at biblioteksfunksjonene kommer med; dette gjøres med en `#include`-spesifikasjon, se linje 7 i figur 2.1 på forrige side.

```
> gcc -x c -o primes primes.rusc
> ./primes
   2   3   5   7  11  13  17  19  23  29
  31  37  41  43  47  53  59  61  67  71
  73  79  83  89  97 101 103 107 109 113
 127 131 137 139 149 151 157 163 167 173
 179 181 191 193 197 199 211 223 227 229
 233 239 241 251 257 263 269 271 277 281
 283 293 307 311 313 317 331 337 347 349
 353 359 367 373 379 383 389 397 401 409
 419 421 431 433 439 443 449 457 461 463
 467 479 487 491 499 503 509 521 523 541
 547 557 563 569 571 577 587 593 599 601
 607 613 617 619 631 641 643 647 653 659
 661 673 677 683 691 701 709 719 727 733
 739 743 751 757 761 769 773 787 797 809
 811 821 823 827 829 839 853 857 859 863
 877 881 883 887 907 911 919 929 937 941
 947 953 967 971 977 983 991 997
```

2.2 RusC-program

Et RusC-program er rett og slett en samling funksjoner (kjent som «metoder» i Java). Før, mellom og etter disse funksjonene kan man deklarere globale variabler.

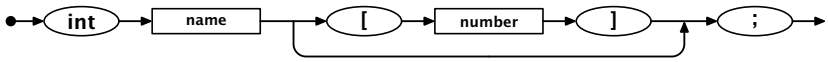
Det må alltid eksistere en funksjon med navn `main` og programutførelsen starter alltid med å kalle denne funksjonen. (Funksjonen `main` kan ikke ha noen parametre.)

2.2.1 Variabler

Brukeren kan deklarere enten globale variabler eller variabler som er lokale i en funksjon. Den eneste datatypen er `int`, men det er mulig å deklarere vektorer («array»-er) av `int`-er. Vektorer indekseres fra 0 (som i C og Java).

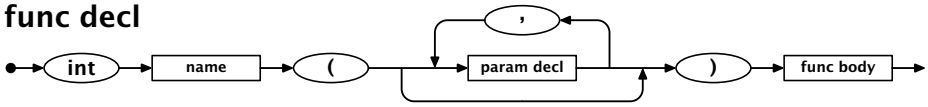
Det er ikke mulig å angi noen initialverdi for variabler – de inneholder en ukjent verdi før de tilordnes en ny verdi av programmet.

var decl



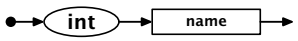
Figur 2.3: Jernbanediagram for ⟨var decl⟩

func decl



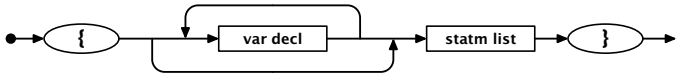
Figur 2.4: Jernbanediagram for ⟨func decl⟩

param decl



Figur 2.5: Jernbanediagram for ⟨param decl⟩

func body



Figur 2.6: Jernbanediagram for ⟨func body⟩

Funksjon	Effekt
`int exit (int status)`	Gir dump om `status`≠0; avslutter programmet med angitt statusverdi.
`int getchar ()`	Leser neste tegn fra tastaturet.
`int getint ()`	Leser neste heltall fra tastaturet.
`int putchar (int c)`	Skriver et tegn på skjermen.
`int putint (int c)`	Skriver et heltall på skjermen.

Tabell 2.1: RusCs biblioteksfunksjoner

2.2.2 Funksjoner

Brukeren kan deklarere funksjoner med inntil fire parametre; parametrene kan ikke være vektorer. Parameteroverføringen skjer ved kopiering (som i C og Java).

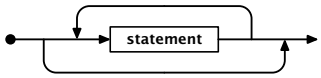
Alle funksjoner er `int`-funksjoner, dvs at de returnerer en `int`-verdi. Hvis ingen eksplisitt verdi er angitt (med en `return`-setning), returneres en tilfeldig verdi.

Det er ikke lov å kalle en funksjon rekursivt (dvs la en funksjon kalle seg selv). Det er også bare lov å kalle funksjoner som er definert tidligere i programkoden.

2.2.2.1 Biblioteket

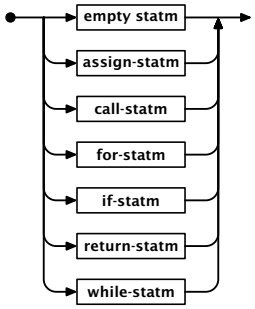
RusC kjenner til de fem biblioteksfunksjonene som er vist i tabell 2.1. Disse kan brukes uten noen spesiell importering.

statm list



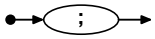
Figur 2.7: Jernbanediagram for ⟨statm list⟩

statement



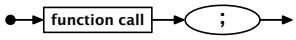
Figur 2.8: Jernbanediagram for ⟨statement⟩

empty statm



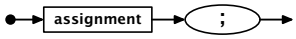
Figur 2.9: Jernbanediagram for ⟨empty statm⟩

call-statm



Figur 2.10: Jernbanediagram for ⟨call-statm⟩

assign-statm



Figur 2.11: Jernbanediagram for ⟨assign-statm⟩

2.2.3 Setninger

RusC kjenner til syv ulike setninger.

2.2.3.1 Tomme setninger

En tom setning (der det ikke står noe foran semikolonet) er også lov i RusC. Naturlig nok gjør den ingenting.

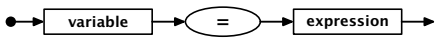
2.2.3.2 Funksjonskall

Et funksjonskall kan brukes som en egen setning.

2.2.3.3 Tilordninger

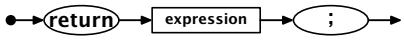
Det er tillatt å tilordne verdier til vanlige enkle variabler eller vektorelementer.

assignment



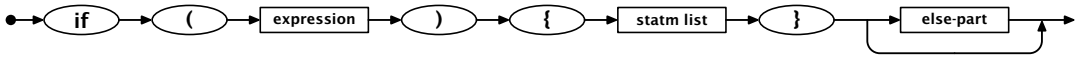
Figur 2.12: Jernbanediagram for ⟨assignment⟩

return-statm



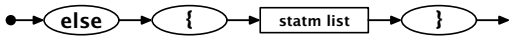
Figur 2.13: Jernbanediagram for ⟨return-statm⟩

if-statm



Figur 2.14: Jernbanediagram for ⟨if-statm⟩

else-part



Figur 2.15: Jernbanediagram for ⟨else-part⟩

while-statm

Figur 2.16: Jernbanediagram for ⟨while-statm⟩

for-statm

Figur 2.17: Jernbanediagram for ⟨for-statm⟩

2.2.3.4 `return`-setninger

En slik setning avslutter utførelsen av en funksjon og angir samtidig returverdien.

2.2.3.5 `if`-setninger

Disse setningene brukes til å velge om noen setninger skal utføres eller ikke. Selve testen er et uttrykk som beregnes: verdien 0 angir *usann* mens alle andre verdier angir *sann*.

`if`-tester kan utstyres med en `else`-gren når man vil angi et alternativ.

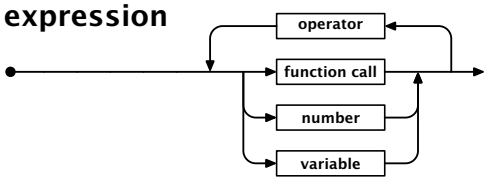
2.2.3.6 `while`-setninger

En `while`-setning går i løkke inntil testuttrykket beregnes til 0.

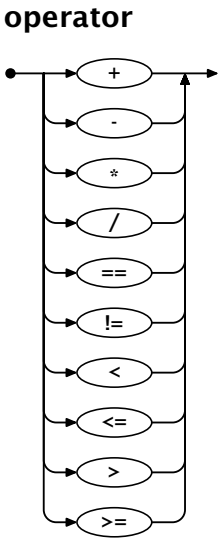
2.2.3.7 `for`-setninger

En `for`-setning er en slags utvidelse av `while`-setningen: i tillegg til sluttesten har den en initieringsdel som utføres aller først og en oppdateringsdel som utføres etter hvert gjennomløp av løkken.

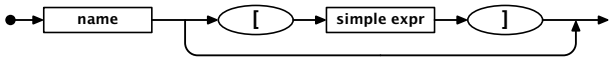
Figur 2.18: Jernbanediagram for ⟨for-control⟩



Figur 2.19: Jernbanediagram for ⟨expression⟩



Figur 2.20: Jernbanediagram for ⟨operator⟩



Figur 2.21: Jernbanediagram for ⟨variable⟩

2.2.4 Uttrykk

Uttrykk i RusC har ingen parenteser og ingen presedens[3] – alle uttrykk beregnes alltid rett frem fra venstre mot høyre.

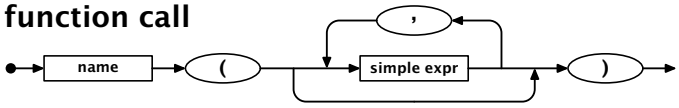
2.2.4.1 Enkle uttrykk

I noen sammenhenger (dvs som parametre eller som indekser i vektorer) er det bare lov å ha ganske enkle former for uttrykk, dvs bare en enkel variabel eller et tall.

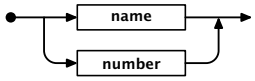
[3] Vanligvis har operatorer ulik *presedens*, dvs at noen operatorer binder sterkere enn andre. Når vi skriver for eksempel

$$a + b \times c$$

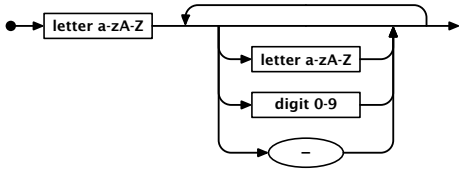
tolkes dette vanligvis som $a + (b \times c)$ fordi $\times$ normalt har høyere presedens enn $+$, dvs $\times$ binder sterkere enn $+$. Men slik er det altså ikke i RusC!



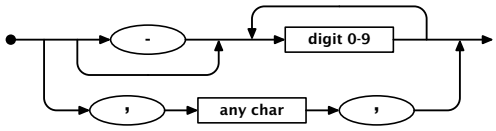
Figur 2.22: Jernbanediagram for ⟨function call⟩



Figur 2.23: Jernbanediagram for ⟨simple expr⟩



Figur 2.24: Jernbanediagram for ⟨name⟩



Figur 2.25: Jernbanediagram for ⟨number⟩

2.2.4.2 Tall og tegn

Heltall brukes som vanlig i RusC. I tillegg er det lov å bruke tegnkonstanter (men altså ikke tekster på mer enn ett tegn). Slike tegnkonstanter betraktes som tall der verdien er tegnets representasjon i ISO 8859-1 som er standard tegnsett ved Ifi; se tabell 2.2 på neste side.

2.2.5 Andre ting

Det er et par andre ting man bør merke seg ved RusC:

- Kommentarlinjer har et «#» som aller første tegn; da skal hele linjen ignoreres.
- Kommentarer kan også angis som «`/*...*/`» og kan da strekke seg over flere linjer.

2.3 Forskjeller til C

RusC er en forenklet C, så det er mange elementer i C som mangler. Her er noen av dem, sortert etter viktighet (slik vi ser det):

- Det er ingen parenteser i uttrykk.

ISO 8859–1

0	000 00	32		040 20	64	@	100 40	96	‘	140 60	128	200 80	160		240 A0	192	À	300 C0	224	à	340 E0
1	001 01	33	!	041 21	65	A	101 41	97	a	141 61	129	201 81	161	¡	241 A1	193	Á	301 C1	225	á	341 E1
2	002 02	34	"	042 22	66	B	102 42	98	b	142 62	130	202 82	162	¢	242 A2	194	Â	302 C2	226	â	342 E2
3	003 03	35	#	043 23	67	C	103 43	99	c	143 63	131	203 83	163	£	243 A3	195	Ã	303 C3	227	ã	343 E3
4	004 04	36	$	044 24	68	D	104 44	100	d	144 64	132	204 84	164	¤	244 A4	196	Ä	304 C4	228	ä	344 E4
5	005 05	37	%	045 25	69	E	105 45	101	e	145 65	133	205 85	165	¥	245 A5	197	Å	305 C5	229	å	345 E5
6	006 06	38	&	046 26	70	F	106 46	102	f	146 66	134	206 86	166	¦	246 A6	198	Æ	306 C6	230	æ	346 E6
7	007 07	39	’	047 27	71	G	107 47	103	g	147 67	135	207 87	167	§	247 A7	199	Ç	307 C7	231	ç	347 E7
8	010 08	40	(	050 28	72	H	110 48	104	h	150 68	136	210 88	168	¨	250 A8	200	È	310 C8	232	è	350 E8
9	011 09	41	)	051 29	73	I	111 49	105	i	151 69	137	211 89	169	©	251 A9	201	É	311 C9	233	é	351 E9
10	012 0A	42	*	052 2A	74	J	112 4A	106	j	152 6A	138	212 8A	170	ª	252 AA	202	Ê	312 CA	234	ê	352 EA
11	013 0B	43	+	053 2B	75	K	113 4B	107	k	153 6B	139	213 8B	171	«	253 AB	203	Ë	313 CB	235	ë	353 EB
12	014 0C	44	,	054 2C	76	L	114 4C	108	l	154 6C	140	214 8C	172	¬	254 AC	204	Ì	314 CC	236	ì	354 EC
13	015 0D	45	–	055 2D	77	M	115 4D	109	m	155 6D	141	215 8D	173	-	255 AD	205	Í	315 CD	237	í	355 ED
14	016 0E	46	.	056 2E	78	N	116 4E	110	n	156 6E	142	216 8E	174	®	256 AE	206	Î	316 CE	238	î	356 EE
15	017 0F	47	/	057 2F	79	O	117 4F	111	o	157 6F	143	217 8F	175	¯	257 AF	207	Ï	317 CF	239	ï	357 EF
16	020 10	48	0	060 30	80	P	120 50	112	p	160 70	144	220 90	176	°	260 B0	208	Đ	320 D0	240	ð	360 F0
17	021 11	49	1	061 31	81	Q	121 51	113	q	161 71	145	221 91	177	±	261 B1	209	Ñ	321 D1	241	ñ	361 F1
18	022 12	50	2	062 32	82	R	122 52	114	r	162 72	146	222 92	178	²	262 B2	210	Ò	322 D2	242	ò	362 F2
19	023 13	51	3	063 33	83	S	123 53	115	s	163 73	147	223 93	179	³	263 B3	211	Ó	323 D3	243	ó	363 F3
20	024 14	52	4	064 34	84	T	124 54	116	t	164 74	148	224 94	180	´	264 B4	212	Ô	324 D4	244	ô	364 F4
21	025 15	53	5	065 35	85	U	125 55	117	u	165 75	149	225 95	181	µ	265 B5	213	Õ	325 D5	245	õ	365 F5
22	026 16	54	6	066 36	86	V	126 56	118	v	166 76	150	226 96	182	¶	266 B6	214	Ö	326 D6	246	ö	366 F6
23	027 17	55	7	067 37	87	W	127 57	119	w	167 77	151	227 97	183	·	267 B7	215	×	327 D7	247	÷	367 F7
24	030 18	56	8	070 38	88	X	130 58	120	x	170 78	152	230 98	184	¸	270 B8	216	Ø	330 D8	248	ø	370 F8
25	031 19	57	9	071 39	89	Y	131 59	121	y	171 79	153	231 99	185	¹	271 B9	217	Ù	331 D9	249	ù	371 F9
26	032 1A	58	:	072 3A	90	Z	132 5A	122	z	172 7A	154	232 9A	186	º	272 BA	218	Ú	332 DA	250	ú	372 FA
27	033 1B	59	;	073 3B	91	[	133 5B	123	{	173 7B	155	233 9B	187	»	273 BB	219	Û	333 DB	251	û	373 FB
28	034 1C	60	<	074 3C	92	\	134 5C	124	|	174 7C	156	234 9C	188	¼	274 BC	220	Ü	334 DC	252	ü	374 FC
29	035 1D	61	=	075 3D	93	]	135 5D	125	}	175 7D	157	235 9D	189	½	275 BD	221	Ý	335 DD	253	ý	375 FD
30	036 1E	62	>	076 3E	94	^	136 5E	126	~	176 7E	158	236 9E	190	¾	276 BE	222	Þ	336 DE	254	þ	376 FE
31	037 1F	63	?	077 3F	95	_	137 5F	127		177 7F	159	237 9F	191	¿	277 BF	223	ß	337 DF	255	ÿ	377 FF

Tabell 2.2: Tegnsettet ISO 8859-1

- Det er bare én datatype: `int`. Det er altså ingen `struct`-er eller `union`-er og heller ingen `typedef`-er.
- Funksjoner kan bare ha inntil fire parametre, og vektorer kan ikke være parametre.
- Det er ingen `do-while`- eller `switch`-setninger.
- Det er ingen preprosessordirektiver («*#xxx*-linjer»).[4]
- Funksjonsbiblioteket er minimalt sammenlignet med C.

[4] #-linjer er lov i RusC men betraktes kun som kommentarer.

Kapittel 3

Datamaskinen Rask

Rask er en enkel datamaskin inspirert av MIPS-prosessoren som var meget populær på 1990-tallet. Det er en typisk RISC[1]-maskin.

Maskinen Rask har

1) en prosessor,
2) 32 generelle registre,
3) et **PC**-register og
4) et minne med 10 000 lokasjoner.

3.1 Registrene

Registre er små datalagre inne i selve prosessoren i datamaskinen; hvert register kan inneholde ett tall. Datamaskiner har oftest 4–32 registre, og vår Rask-maskin har altså 32 med de fantasiløse navnene $\mathbf{R_0}$–$\mathbf{R_{31}}$. (I tillegg har Rask et **PC**-register som alle andre datamaskiner.)

3.1.1 Spesielle registre

De fleste av registrene våre er generelle, men to er ganske spesielle:

$\mathbf{R_0}$ inneholder alltid verdien 0.

$\mathbf{R_{31}}$ får automatisk returadressen når man foretar et funksjonskall (med instruksjonen CALL).

3.2 Instruksjonene

Rask har 17 **instruksjoner** vist i tabell 3.1 på neste side.

[1] RISC («Reduced instruction set computer») betegner datamaskiner med få og enkle instruksjoner som kan utføres meget raskt. Det motsatte er CISC («Complex instruction set computer»).

Nr	Navn	Operasjon
1	LOAD $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, C	$\mathbf{R_A} \leftarrow \text{Mem}[\mathbf{R_B}+C]$
2	SET $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, C	$\mathbf{R_A} \leftarrow \mathbf{R_B}+C$
3	STORE $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, C	$\text{Mem}[\mathbf{R_B}+C] \leftarrow \mathbf{R_A}$
4	ADD $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$	$\mathbf{R_A} \leftarrow \mathbf{R_B}+\mathbf{R_C}$
5	SUB $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$	$\mathbf{R_A} \leftarrow \mathbf{R_B}-\mathbf{R_C}$
6	MUL $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$	$\mathbf{R_A} \leftarrow \mathbf{R_B}\times\mathbf{R_C}$
7	DIV $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$	$\mathbf{R_A} \leftarrow \mathbf{R_B}/\mathbf{R_C}$
8	EQ $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$	$\mathbf{R_A} \leftarrow 1$ hvis $\mathbf{R_B}=\mathbf{R_C}$, ellers 0
9	NEQ $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$	$\mathbf{R_A} \leftarrow 1$ hvis $\mathbf{R_B}\neq\mathbf{R_C}$, ellers 0
10	LESS $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$	$\mathbf{R_A} \leftarrow 1$ hvis $\mathbf{R_B}<\mathbf{R_C}$, ellers 0
11	LESSEQ $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$	$\mathbf{R_A} \leftarrow 1$ hvis $\mathbf{R_B}\leq\mathbf{R_C}$, ellers 0
12	GTR $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$	$\mathbf{R_A} \leftarrow 1$ hvis $\mathbf{R_B}>\mathbf{R_C}$, ellers 0
13	GTREQ $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$	$\mathbf{R_A} \leftarrow 1$ hvis $\mathbf{R_B}\geq\mathbf{R_C}$, ellers 0
14	JUMPEQ $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, C	Hvis $\mathbf{R_A}=\mathbf{R_B}$: $\mathbf{PC} \leftarrow C$
15	JUMPNEQ $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, C	Hvis $\mathbf{R_A}\neq\mathbf{R_B}$: $\mathbf{PC} \leftarrow C$
16	CALL $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, C	$\mathbf{R_{31}} \leftarrow \mathbf{PC}$ og $\mathbf{PC} \leftarrow C$
17	RET	$\mathbf{PC} \leftarrow \mathbf{R_{31}}$

Tabell 3.1: Rask-instruksjoner

3.2.1 Koding av instruksjonene

For at et program skal kunne kjøres på Rask må instruksjonene lagres som tall. Alle Rask-instruksjonene består av fire deler:

Nr angir hvilken instruksjon det er snakk om; lovlige verdier er 1–17.

A angir et register 0–31.

B angir også et register 0–31.

C er enten et register 0–31, en minneadresse 0–9 999 eller positiv tallkonstant 0–9 999 999 999.

Instruksjonen lagres slik:

$$\text{Nr} \cdot 10^{14} + A \cdot 10^{12} + B \cdot 10^{10} + C$$

3.3 Operativsystemet

Rask har et ørlite operativsystem. Det gir tilgang til I/O-operasjoner og annet når vi foretar et CALL til de «magiske» adressene vist i tabell 3.2 på neste side.

3.4 Maskinkoden Rasko

Når Rask-maskinen starter, leser den en fil som forteller hva som skal ligge i minnecellene i maskinen når kjøringen starter; det dreier seg da om både

Adresse	Funksjon
9990	`exit(`$\mathbf{R}_{11}$`)`
9991	`getchar()`
9992	`getint()`
9993	`putchar(`$\mathbf{R}_{11}$`)`
9994	`putint(`$\mathbf{R}_{11}$`)`

Tabell 3.2: «Magiske» minnelokasjoner i Rask

instruksjoner og initialverdier for variabler.[2] Denne filen er i et spesielt format kalt Rasko.

Rasko-formatet er meget enkelt:

- Tegnet # og alt som står etter på linjen, ignoreres.
- Ellers inneholder filen bare diverse heltall; det kan stå vilkårlig mange på hver linje. Første tall angir innholdet i celle nr. 0, det neste i celle nr. 1, osv.

Det er også vanlig at første linje i en Rasko-fil ser slik ut:

```
#! /local/bin/rask
```

slik at kodefilen kan gjøres eksekverbar i Unix, men dette er intet krav. Uansett blir denne linjen ignorert som kommentar (slik reglene ovenfor tilsier) av Rask-maskinen.

[2] Husk at Rask-maskinen i utgangspunktet ikke vet forskjell på instruksjoner og data – for den er alt tall.

Kapittel 4

Assemblerkode Raskas

Når man vil ha maskinen Rask til å utføre en bestemt oppgave, må man først fylle instruksjonslageret med en sekvens av instruksjoner som tilsammen løser oppgaven når maskinen blir satt i gang. For en del oppgaver er det også aktuelt å fylle bestemte tall i noen av cellene som skal brukes som data.

For at vi skal slippe å bruke tallkoder når vi skal «håndprogrammere» maskinen Rask, er det laget en bokstavkode (på tre til syv bokstaver) for hver instruksjon, og det finnes et program (kalt en **assembler**) som oversetter dette til riktig tallkode. Bokstavkoden er den samme som er brukt i beskrivelsen av Rask-maskinen (se tabell 3.1 på side 34). Assembleren (og assembler-språket) på Rask kalles Raskas.

Når vi skal skrive et program på denne måten skriver vi én instruksjon på hver linje, og bak bokstavkoden for instruksjonen kan man angi adressedelen som et tall (eller som et adressenavn; det omtales lenger ned). Av grunner vi skal se senere må instruksjonskoden ikke starte i første posisjon på linja.

En del av et program kan for eksempel se slik ut:

```
CALL    putchar    # putchar(   );

CALL    getint     # R1 = getint();
SET     R3,1       #          1
ADD     R11,R1,R3  # R11 = R1+ ;
```

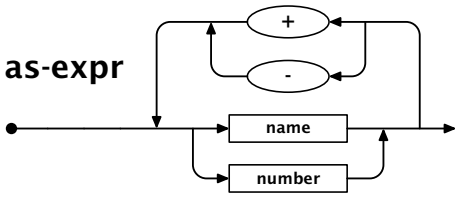
4.1 Kommentarer og blanke linjer

Blanke linjer vil Flass-assembleren bare hoppe over, og om man vil ha kommentarer på en linje kan man bare skrive '#' så vil *resten av linjen* da bli tatt som kommentar. Det er vanlig når man skriver slike programmer at alle instruksjonskodene og alle adressedelene skrives rett under hverandre.

4.2 Instruksjonslinjer

Hver instruksjonslinje ser slik ut:

⟨etikett⟩ ⟨instr⟩ ⟨param$_1$⟩ ⟨param$_2$⟩ ⟨param$_3$⟩ # ⟨kommentar⟩



Figur 4.1: Jernbanediagram for uttrykk i Raskas

De ulike feltene er:

⟨etikett⟩ omtales i avsnitt 4.3 på neste side.

⟨instr⟩ er én av følgende

- et instruksjonsnavn fra listen i tabell 3.1 på side 34,
- ordet «`INT`» (som omtales i avsnitt 4.4 på side 40),
- ordet «`RES`» (som også omtales i avsnitt 4.4 på side 40) eller
- ordet «`EQU`» (som du kan lese om i avsnitt 4.5 på side 40).

Disse navnene kan skrives med store eller små bokstaver, avhengig av personlig smak.

⟨param$_n$⟩ angir parametre til instruksjonene nevnt over. For `INT`, `RES` og `EQU` vil dette alltid være en verdi (se avsnitt 4.2.1), mens for instruksjonene i tabell 3.1 på side 34 vil det være

⟨param$_1$⟩ vil alltid være et register (altså `R0`–`R31`).

⟨param$_2$⟩ vil også alltid være et register.

⟨param$_3$⟩ vil enten være et register eller en verdi; dette avhenger av hvilken instruksjon det er snakk om og tabell 3.1 på side 34 viser dette klart.

Det er også verdt å merke seg at man kan droppe parametre om de er $\mathbf{R_0}$ eller 0. Dette skjer etter følgende regel:

- Om det bare er gitt to parametre, antas at ⟨param$_2$⟩ skal være $\mathbf{R_0}$.
- Om det bare er gitt én parameter, antas i tillegg at ⟨param$_1$⟩ skal være $\mathbf{R_0}$.
- Er det ikke gitt noen parametre, er dessuten ⟨param$_3$⟩ enten 0 eller $\mathbf{R_0}$ (avhengig av instruksjonen).

4.2.1 Verdier

En Raskas-verdi gis som et enkelt uttrykk etter grammatikken vist i figur 4.1. (Definisjonen av ⟨name⟩ og ⟨number⟩ finner du i figurene 2.24 og 2.25 på side 30.)

4.3 Etiketter

Assembleren vil legge instruksjonene den får oppgitt etter hverandre fra celle 0 og utover, og den har ingen som helst kontroll over om det er en rimelig sekvens av instruksjoner man oppgir. Hvis det var starten av programmet vi anga på side 37, ville altså '`CALL putchar`' komme som instruksjon nr 0, '`CALL getint`' som instruksjon nr 1 osv. De cellene i lageret man ikke sier noe om, vil ha en ukjent verdi når man (etter at assembleren er ferdig) starter programmet.

Om man skal lage en hoppinstruksjon, skal adressedelen av denne være nummeret på den instruksjonscellen man vil hoppe til. Hvis dette er en del av et program:

```
        ADD     R1,R1,R2   # i celle 10
        ADD     R2,R2,R3   # i celle 11
        JUMPNEQ 10         # i celle 12
```

vil altså hoppet gå til instruksjonen '`ADD R1,R1,R2`', da den ligger i celle 10. Dette å holde greie på hvor de forskjellige instruksjonene havner, er imidlertid en tung affære, og om man etterpå finner ut at man skulle begynne programmet litt annerledes slik at ting flytter seg noen «hakk» i lageret, ville mange adressedeler måtte forandres.

Siden det er assembleren som har størst oversikt over hvor ting havner i lageret, tilbyr den hjelp for å komme ut av dette problemet. Man kan foran en instruksjon sette et selvvalgt navn (med vanlig navne-syntaks, som vist i figur 2.24 på side 30). Et slikt navn må starte i første posisjon på linjen. Dette navnet vil så av assembleren bli identifisert med nummeret på den cellen der den etterfølgende instruksjonen havner, og det kan derfor brukes i stedet for tall, som adressedel til en instruksjon. Hvilket tall et navn blir identifisert med er da ofte ikke så viktig, men det kan alltid leses ut av listingen fra assembleren om man er interessert.

Det trengs ikke noe mer deklarasjon av et slikt navn enn at det forekommer foran en instruksjon en gang, og det kan brukes som adressedel mange ganger i programmet, både foran og etter den instruksjonen der det er definert. Programmet over kunne da vært skrevet:

```
loop    ADD     R1,R1,R2   # i celle 10
        ADD     R2,R2,R3   # i celle 11
        JUMPNEQ loop       # i celle 12
```

Navnet `loop` blir altså her av assembleren identifisert med tallet 10. Legg merke til at man også godt kan bruke dette i instruksjonen

```
        SET     R1,loop
```

Utførelsen av denne fører altså til at Reg1-registeret får verdien 10, nøyaktig som om vi hadde skrevet '`SET R1,10`'.

Navnet `loop` kalles en *etikett* («label» på engelsk).[1] Det er også mulig å skrive en etikett alene på en linje. Den vil da referere til neste celle

[1] Mange liker å skrive et kolon bak slike etiketter der de defineres. Det kan man godt gjøre; slike kolon vil bare bli ignorert.

i instruksjonslageret, og man kan da oppnå å ha flere navn på samme instruksjon. I programbiten

```
        JUMPEQ  R1,R0,Hit
         ⋮
Hit:
Her:    SET     R1,2
         ⋮
        JUMPEQ  R1,R0,Her
```

vil hoppene til `Hit` og `Her` havne samme sted, nemlig til instruksjonen '`SET R1,2`'.

Etikettene i tabell 3.2 på side 35 er forhåndsdefinert, så de kan man bruke uten videre.

4.4 Å reservere plass til variabler

Assembleren tilbyr også hjelp når det gjelder å fylle opp og administrere plassen i lageret for heltall. Om man midt inne i instruksjonssekvensen finner ut at man vil fylle en celle i heltallslageret med et gitt tall, kan man bare skrive for eksempel:

```
Var1    INT     27
```

I og med at det i «funksjonsdelen» her står `INT`, forstår assembleren at du vil sette av en datacelle i minnet og at denne skal ha en gitt initialverdi.

Om man blir avansert, og vil sette av et større område i lageret, vil assembleren gjøre dette om man sier for eksempel:

```
Array   RES     28
```

Dette tilsvarer 28 linjer med «`INT 0`». Etiketten (med navnet `Array` her) vil da være adressen til den første cellen.

4.5 Å definere konstanter

En siste mulighet man har i en assembler er at man kan definere konstanter, altså navn for gitte tallverdier.[2]

```
Antall  EQU     8
         ⋮
Tab:    RES     Antall
```

Her settes det av 8 celler.

[2] En konstant er nesten det samme som man oppnår ved å bruke etiketter, men man kan gi konstanter nøyaktig hvilken tallverdi man ønsker – etiketter får alltid en tallverdi som er adressen til neste celle i minnet.

nexta.raskas

```
# Et minimalt testprogram:
# Det ber om et tall v og skriver så ut v+1.

main:   SET     R11,'?'     #         '?'
        CALL    putchar     # putchar(   );
        SET     R11,' '     #         ' '
        CALL    putchar     # putchar(   );

        CALL    getint      # R1 = getint();
        SET     R3,1        #          1
        ADD     R11,R1,R3   # R11 = R1+ ;
        CALL    putint      # putint(R11);
        SET     R11,10      #         LF
        CALL    putchar     # putchar(  );

        SET     R11,0       #      0
        CALL    exit        # exit( );
```

Figur 4.2: Et eksempelprogram skrevet i Raskas-kode

4.6 Et eksempel

I figur 4.2 er vist kildefilen til et lite program skrevet i Raskas-kode, og figurene 4.3 og 4.4 viser henholdsvis listingen og koden produsert ved å utføre kommandoen

```
> raskas nexta.raskas
```

Den genererte kodefilen kan selvfølgelig utføres:

```
> rask nexta.rask
? -754
-753
```

nexta.list

```
Raskas assembler version 1.0
Source file: nexta.raskas

                      # Et minimalt testprogram:
                      # Det ber om et tall v og skriver så ut v+1.

   0:  2 11  0      63  main:   SET     R11,'?'     #         '?'
   1: 16  0  0    9993          CALL    putchar     # putchar(   );
   2:  2 11  0      32          SET     R11,' '     #         ' '
   3: 16  0  0    9993          CALL    putchar     # putchar(   );

   4: 16  0  0    9992          CALL    getint      # R1 = getint();
   5:  2  3  0       1          SET     R3,1        #          1
   6:  4 11  1       3          ADD     R11,R1,R3   # R11 = R1+ ;
   7: 16  0  0    9994          CALL    putint      # putint(R11);
   8:  2 11  0      10          SET     R11,10      #         LF
   9: 16  0  0    9993          CALL    putchar     # putchar(  );

  10:  2 11  0       0          SET     R11,0       #      0
  11: 16  0  0    9990          CALL    exit        # exit( );

Program labels:
exit       9990
getchar    9991
getint     9992
main          0
putchar    9993
putint     9994
```

Figur 4.3: Listing produsert av raskas fra programmet i figur 4.2

nexta.rask

```
#! /local/bin/rask

211000000000063
1600000000009993
211000000000032
1600000000009993
1600000000009992
203000000000001
411010000000003
1600000000009994
211000000000010
1600000000009993
211000000000000
1600000000009990
```

Figur 4.4: Kjørbar Rasko-kode produsert av raskas fra programmet i figur 4.2

Kapittel 5

Kodegenerering

5.1 Konvensjoner

Når vi skal generere kode, er det en stor fordel å være enige om visse ting, for eksempel registerbruk. Derfor skal noen registre brukes slik det er angitt i tabell 5.1 på neste side.

5.2 Beregning av uttrykk

5.2.1 Operander i uttrykk

I tabell 5.2 på neste side er vist hvilken kode som må genereres for å hente en verdi inn i register R_1. Funksjonskall er ikke tatt med her – det er beskrevet i avsnitt 5.7.2 på side 46. Legg forøvrig spesielt merke til dette:

- Negative konstanter må spesialbehandles: først setter man inn den positive verdien og etterpå snur man fortegnet med en SUB-instruksjon.

5.2.2 Operatorer i uttrykk

I tabell 5.3 på neste side er vist hvorledes man oversetter en addisjon; de andre operasjonen gjøres helt tilsvarende.

5.3 Tilordning

Se tabell 5.4.

5.4 If-setninger

It-tester oversettes som vist i tabell 5.5.

5.5 While-setninger

While-løkker oversettes som vist i tabell 5.6 på side 45.

$\mathbf{R_0}$	Alltid 0	(gitt av Rask)
$\mathbf{R_1}$	Hovedregister for beregning av uttrykk	
$\mathbf{R_2}$	Hjelperegister ved vektoraksess	
$\mathbf{R_3}$	Hjelperegister ved beregning av uttrykk	
$\mathbf{R_{11}}$	Parameter 1 ved funksjonskall	
$\mathbf{R_{12}}$	Parameter 2 ved funksjonskall	
$\mathbf{R_{13}}$	Parameter 3 ved funksjonskall	
$\mathbf{R_{14}}$	Parameter 4 ved funksjonskall	
$\mathbf{R_{31}}$	Returadresse ved funksjonskall	(gitt av Rask)

Tabell 5.1: Vår konvensjon for bruk av Rask-registre

⟨n⟩	⇒	`SET R1,R0,`⟨n⟩
-⟨n⟩	⇒	`SET R1,R0,`⟨n⟩ `SUB R1,R0,R1`
⟨v⟩	⇒	`LOAD R1,R0,Adr(`⟨v⟩`)`
⟨v⟩`[`⟨n⟩`]`	⇒	`SET R2,R0,`⟨n⟩ `LOAD R1,R2,Adr(`⟨v⟩`)`
⟨v⟩`[`⟨v_2⟩`]`	⇒	`LOAD R2,R0,Adr(`⟨v_2⟩`)` `LOAD R1,R2,Adr(`⟨v⟩`)`

Tabell 5.2: Oversettelse av operand i uttrykk

⟨e_1⟩ + ⟨e_2⟩	⇒	⟨Beregn ⟨e_1⟩ med svaret i $\mathbf{R_1}$⟩
		`SET R3,R1,0`
		⟨Beregn ⟨e_2⟩ med svaret i $\mathbf{R_1}$⟩
		`ADD R1,R3,R1`

Tabell 5.3: Oversettelse av operatoren +

⟨v⟩ = ⟨e⟩;	⇒	⟨Beregn ⟨e⟩ med svaret i $\mathbf{R}_1$⟩ STORE R1,R0,Adr(⟨v⟩)
⟨v⟩[⟨n⟩] = ⟨e⟩;	⇒	⟨Beregn ⟨e⟩ med svaret i $\mathbf{R}_1$⟩ SET R2,R0,⟨n⟩ STORE R1,R2,Adr(⟨v⟩)
⟨v⟩[⟨v_2⟩] = ⟨e⟩;	⇒	⟨Beregn ⟨e⟩ med svaret i $\mathbf{R}_1$⟩ LOAD R2,R0,⟨v⟨2⟩⟩ STORE R1,R2,Adr(⟨v⟩)

Tabell 5.4: Oversettelse av tilordning

if (⟨e⟩) {
⟨S⟩
}
	⇒	⟨Beregn ⟨e⟩ med svaret i $\mathbf{R}_1$⟩
		JUMPEQ R1,R0,Lx
		⟨S⟩
		Lx:

if (⟨e⟩) {
⟨S_1⟩
} else {
⟨S_2⟩
}
	⇒	⟨Beregn ⟨e⟩ med svaret i $\mathbf{R}_1$⟩
		JUMPEQ R1,R0,Le
		⟨S_1⟩
		JUMPEQ R0,R0,Lx
		Le: ⟨S_2⟩
		Lx:

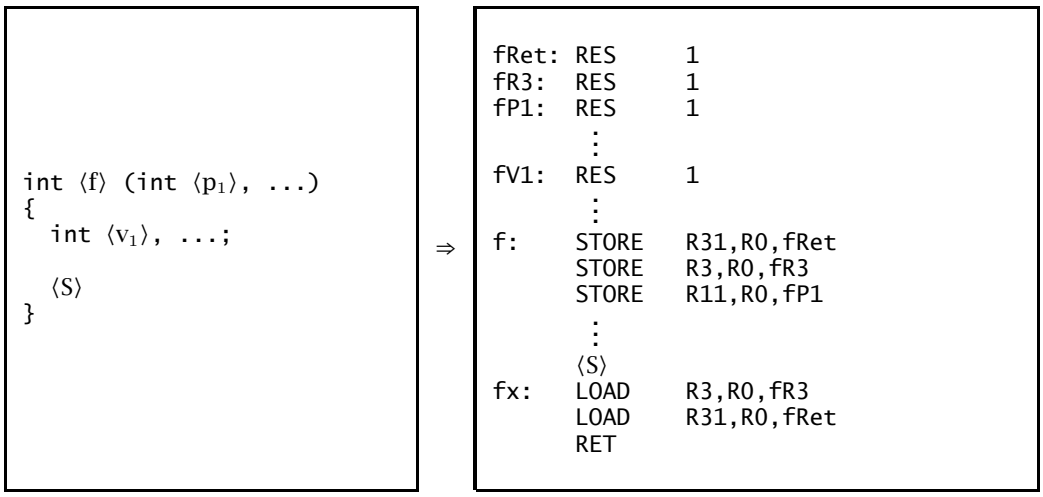
Tabell 5.5: Oversettelse av if-setning

while (⟨e⟩) {
⟨S⟩
}
	⇒	Lw: ⟨Beregn ⟨e⟩ med svaret i $\mathbf{R}_1$⟩
		JUMPEQ R1,R0,Lx
		⟨S⟩
		JUMPEQ R0,R0,Lw
		Lx:

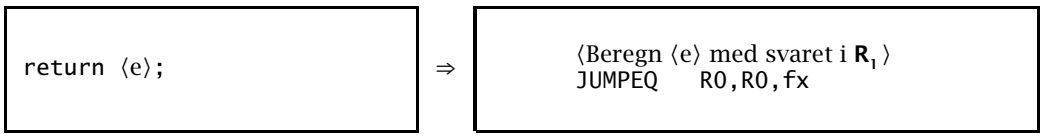
Tabell 5.6: Oversettelse av while-setning

for (⟨A_1⟩; ⟨e⟩; ⟨A_2⟩) {
⟨S⟩
}
	⇒	⟨A_1⟩
		Ft: ⟨Beregn ⟨e⟩ med svaret i $\mathbf{R}_1$⟩
		JUMPEQ R1,R0,Fx
		⟨S⟩
		⟨A_2⟩
		JUMPEQ R0,R0,Ft
		Fx:

Tabell 5.7: Oversettelse av for-setning



Tabell 5.8: Oversettelse av funksjon



Tabell 5.9: Oversettelse av return-setning

5.6 For-setninger

I tabell 5.7 på forrige side kan vi se hvorledes for-løkker skal oversettes.

5.7 Funksjoner

Selve funksjonen oversettes som vist i tabell 5.8. Legg spesielt merke til følgende:

- Returadressen må gjemmes unna i tilfelle denne funksjonen kaller en annen funksjon.
- Av samme grunn plasseres parametrene i minnet.
- Register $\mathbf{R_3}$ må også gjemmes unna fordi det kan bli ødelagt ved beregningen av et uttrykk i denne funksjonen.

Følgelig settes det alltid av 2–6 celler for hver funksjon som deklareres i tillegg til eventuelle lokale variabler.

5.7.1 Return-setningen

Return-setningen gir koden vist i tabell 5.9. Den beregner returverdien og hopper til utgangen av funksjonen.

5.7.2 Funksjonskall

Oversettelse av funksjonskall kan man se i tabell 5.10 på neste side; den er den samme uavhengig av om kallet er en egen setning eller et element

`f()`	⇒	CALL ⟨f⟩
`f(`⟨e$_1$⟩`,`⟨e$_2$⟩`,`⟨e$_3$⟩`,`⟨e$_4$⟩`)`	⇒	⟨Legg ⟨e$_1$⟩ i **R$_{11}$**⟩ ⟨Legg ⟨e$_2$⟩ i **R$_{12}$**⟩ ⟨Legg ⟨e$_3$⟩ i **R$_{13}$**⟩ ⟨Legg ⟨e$_4$⟩ i **R$_{14}$**⟩ CALL ⟨f⟩

Tabell 5.10: Oversettelse av funksjonskall

i et uttrykk. For enkelhets skyld er det bare vist funksjonskall med 0 og 4 parametre.

Kapittel 6

Implementasjonen

Store programmer (og også middelstore programmer) bør deles i passe store **moduler** når de skal implementeres. Langt fra alle programmeringsspråk tilbyr noen slik mekanisme, men Java gjør det i form av `package`-er. Vi skal bruke denne mekanismen, og i tråd med Javas navnetradisjon skal våre pakker hete «`no.uio.ifi.rusc.error`» og tilsvarende.

Vi skal dele prosjektet vårt i pakkene vist i figur 6.1 på neste side. Siden Java kun tillater klasser i pakkene sine, vil vi alltid legge inn en klasse med samme navn[1] som pakken og som inneholder data og metoder som «hører hjemme i» pakken, spesielt de to metodene[2] `init` og `finish` som benyttes for initiering og terminering av modulene. Hver pakke vil altså se ut som vist i figur 6.2 på neste side.

6.1 Modulen Rusc

Denne modulen inneholder `main`-metoden og er dermed «hovedmodulen». Den vil initiere de andre modulene, tolke kommandoparametrene, starte kompileringen og til sist terminere de andre modulene.

6.2 Modulen CharGenerator

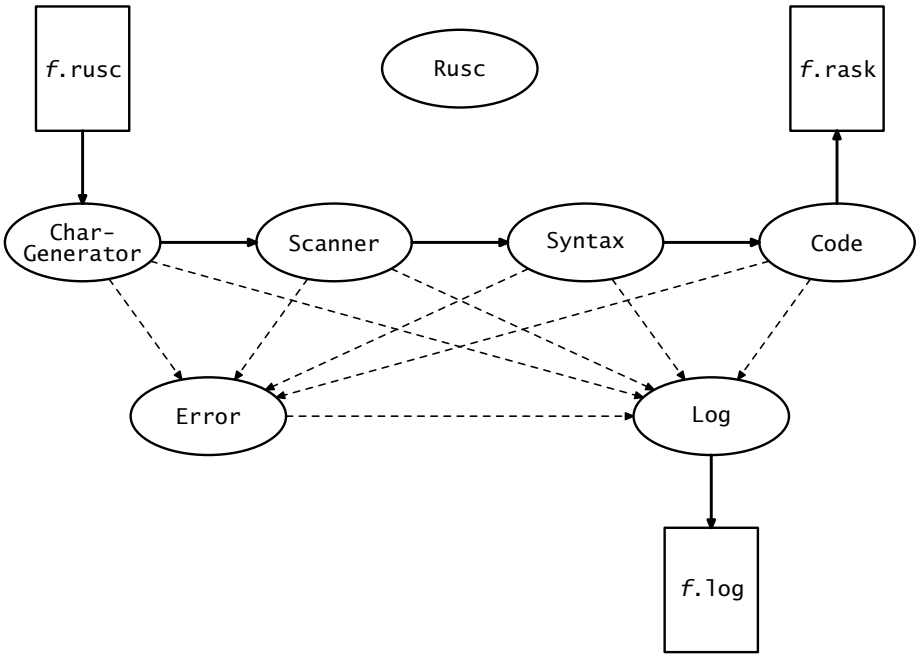
Denne modulen vil lese kildefilen linje for linje, ignorere #-linjer og sende den resterende kildekoden tegn for tegn videre i to variabler: `curC` (med nåværende tegn) og `nextC` (med neste tegn). Metoden `readNext` vil klargjøre neste tegn.

6.3 Modulen Scanner

Denne modulen vil få tegn fra kildefilen (via `CharGenerator`) og levere fra seg symboler i variablene `curToken`, `nextToken` og `nextNextToken`; disse variablene er av klassen `Token`. `curToken` er det aktuelle symbolet vi

[1] Den eneste forskjellen på navnene er kapitaliseringen – Java-pakker skal helst ha liten forbokstav mens Java-klasser bør ha stor.

[2] Disse metodene vil være `static` siden vi aldri skal instansiere disse spesialklassene.



Figur 6.1: Modulene i kompilatoren

```
package no.uio.ifi.rusc.p;

public class P {
    public static ⟨data-deklasjon⟩;
    private static ⟨data-deklasjon⟩;

    public static void init() {
        ⋮
    }

    public static void finish() {
        ⋮
    }

    ⋮
}
```

Figur 6.2: Oppsett for de enkelte moduler

skal analysere, mens `nextToken` og `nextNextToken` er de to etterfølgende symbolene.

Om `curToken` er et `nameToken`, vil `curName` inneholde det aktuelle navnet, og om det er et `numberToken`, vil `curNum` inneholde tallverdien. Det tilsvarende gjelder for `nextName` og `nextNum` og for `nextNextName` og `nextNextNum`.

Metoden `readNext` vil plassere de neste symbolene i `curToken`, `nextToken` og `nextNextToken`. Alle `/*...*/`-kommentarer vil bli oversett.

Når det ikke er flere symboler igjen på filen, vil de tre `—Token`-variablene få verdien `eofToken`.[3]

6.4 Modulen Syntax

Denne modulen tar seg av analysen av RusC-programmet; slik analyse kalles **parsering**. Den inneholder klassen `SyntaxUnit` og diverse subklasser som brukes når parseringstreet skal bygges.

6.5 Modulen Code

Denne modulen tar seg av kodegenereringen. Den inneholder `genLoad`, `genSet` og tilsvarende metoder som genererer hver sin instruksjon. I tillegg har den `resMem` for å sette av plass til variabler og `updateInstr` som oppdaterer adressedelen av en tidligere generert instruksjon.

Avslutningsmetoden `finish` skriver det ferdige programmet ut på en fil i Rasko-format.

6.6 Modulen Error

Denne modulen brukes for feilutskrifter. Den har én sentral metode `error` som skriver en feilmelding på skjermen og i loggfilen.

6.7 Modulen Log

Denne modulen tar seg av logging av informasjon. Den skriver data på filen øyeblikkelig og lukker filen etter hver linje slik at innholdet bevares om kompilatoren krasjer. Modulen har disse nyttige rutinene:

`noteCode` logger informasjon om generert kode, men bare når `doLogCode` er satt.

`noteError` noterer en feilmelding, men bare om loggfilen er i bruk.

`noteRes` lagrer data om reservering av plass til variabler, men bare om `doLogCode` er satt.

[3] «Eof» er en vanlig forkortelse for «end of file».

noteUpdate legger til opplysninger om oppdateringer av tidligere genererte instruksjoner, men bare om `doLogCode` er satt.

enterParser brukes under parseringen til å vise at en ny `parse`-metode kalles, men bare om `doLogParser` er satt.

leaveParser brukes tilsvarende når en parseringsmetode forlates, men også her bare om `doLogParser` er satt.

noteSourceLine legger inn en kildekodelinje i loggen for å vise hvor langt lesingen er kommet; dette skjer kun når `doLogParser` eller `doLogScanner` er satt.

noteToken benyttes av skanneren til å logge hvilke symboler den finner; loggingen skjer bare når `doLogScanner` er satt.

wTree og **wTreeLn** brukes til skrive ut parseringstreet; de virker som `System.out.print` og `System.out.println`.

indentTree brukes når utskriften av parseringstreet skal indenteres et `{}`-nivå.

outdentTree benyttes når et slikt nivå skal avsluttes.

Kapittel 7

Prosjektet

Som nevnt er RusC-kompilatoren et større program enn dere sannsynligvis har skrevet før, så prosjektet er delt i tre deler: en minimal introduksjonsdel og to omtrent like store restdeler, som vist i figur 7.1 på neste side.

På filen ~inf2100/oblig/inf2100-oblig.zip (også tilgjengelig som http://www.ifi.uio.no/~inf2100/oblig/inf2100-oblig.zip) ligger rammen som *skal* brukes til løsningen. Lag en egen mappe til prosjektet deres og gjør så

```
> cd mappen
> copy ~inf2100/oblig/inf2100-oblig.zip .
> unzip inf2100-oblig.zip
> cd inf2100
> make
```

Dette vil resultere i en kjørbar fil `Rusc.jar` som kan kjøres slik

```
> java -jar Rusc.jar minfi.rusc
```

men vær oppmerksom på at den utleverte koden selvfølgelig ikke vil fungere! Denne er er bare en basis du må utvikle til et nyttig program.

Som en hjelp under arbeidet, og for enkelt å sjekke om de ulike delene virker, skal koden kunne håndtere loggutskriftene vist i tabell 7.1 på neste side.

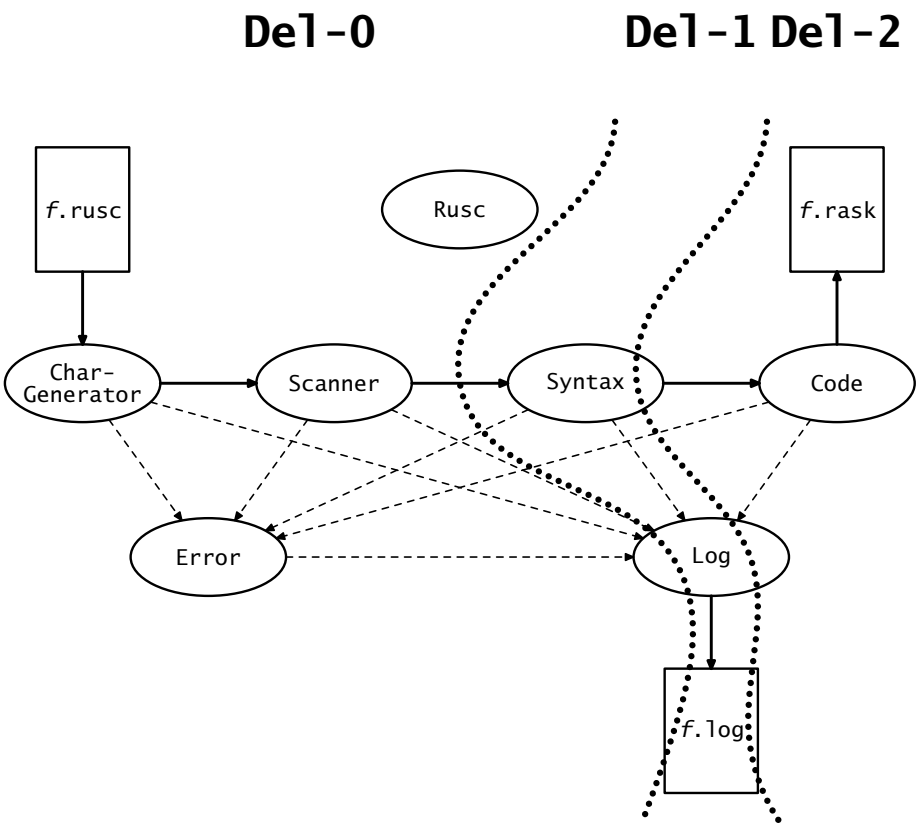
7.1 Del 0

Del 0 er ment som en introduksjon og dreier seg om å få skanneren til å fungere. For å sjekke dette, kan vi gi opsjonen `-testscanner` (som også slår på logging `-logS`):

```
> java -jar Rusc.jar -testscanner mini.rusc
> java -jar Rusc.jar -testscanner primes.rusc
```

der det første testprogrammet er vist i figur 7.2 på neste side og det andre i 2.1 på side 24. De resulterende filene `mini.log` og `primes.log` skal da se ut som vist[1] i henholdsvis figur 7.3 på side 55 og figurene 7.4–7.8 på side 56 og etterfølgende sider.

[1] Siden loggutskriften kommer fra to kilder (`CharGenerator` og `Scanner`), vil linjene fra disse kunne være blandet på en annen måte enn vist i dette kompendiet. Dette er helt normalt og klart akseptabelt.



Figur 7.1: De ulike delene i prosjektet

Opsjon	Del	Hva logges
`-logC`	Del 2	Hvilken Rask-kode genereres
`-logP`	Del 1	Hvilke parseringsmetoder kalles
`-logS`	Del 0	Hvilke symboler hentes fra skanneren
`-logT`	Del 1	Utskrift av parseringstreet

Tabell 7.1: Opsjoner for logging

mini.rusc

```
1  /* Program 'mini'
2     --------------
3     The smallest possible RusC program!
4  */
5
6  int main ()
7  {
8  }
```

Figur 7.2: Et minimalt RusC-program

```
1     1: /* Program 'mini'
2     2:    --------------
3     3:    The smallest possible RusC program!
4     4: */
5     5:
6     6: int main ()
7  Scanner:  intToken
8  Scanner:  nameToken main
9  Scanner:  leftParToken
10 Scanner:  rightParToken
11    7: {
12 Scanner:  leftCurlToken
13    8: }
14 Scanner:  rightCurlToken
15 Scanner:  eofToken
16 Scanner:  eofToken
```

Figur 7.3: Loggfil som demonstrerer skanneren på det minimale RusC-programmet i figur 7.2 på forrige side

7.2 Del 1

Denne delen går ut på å få parseren til å fungere. Dette innebærer å skrive alle klassene som tilsvarer metasymbolene. Ved å kjøre

```
> java -jar Rusc.jar -testparser primes.rusc
```

vil loggfilen vise hvilke `parse`-rutiner som man er innom (opsjonen `-logP`, som settes automatisk av `-testparser`); som kontroll skrives den interne representasjonen av programmet ut (opsjonen `-logT`, som også settes av `-testparser`). Våre vanlige testprogram vist i henholdsvis figur 7.2 på forrige side og figur 2.1 på side 24 vil produsere loggfilene i henholdsvis figur 7.9 på side 61 og figurene 7.10 til 7.17 på side 62 og etterfølgende.[2]

7.3 Del 2

Den siste delen er å få kodegenereringen på plass. Dette sjekkes på tre måter:

- I mappen ~inf2100/oblig/test/ finnes fire RusC-programmer som bør fungere i den forstand at de ikke gir feilmeldinger men genererer riktig kode; resultatet av kjøringene skal dessuten gi resultatet vist i `.res`-filene.
- I mappen ~inf2100/oblig/feil/ finnes diverse småprogrammer som alle inneholder en feil. kompilatoren din bør gi en tilsvarende feilemelding som referansekompilatoren.
- Når vi benytter opsjonen `-logC` på våre standard testprogram (vist i figur 7.2 på forrige side og figur 2.1 på side 24) skal dette gi loggfiler som skal se ut som vist i henholdsvis figur 7.18 på side 69 og figurene 7.19 til 7.21 på side 70 og deretter. (Kommentarene på slutten av hver linje kan droppes eller de kan se ut som du selv ønsker.)

[2] Denne loggutskriften stammer også fra flere kilder, så det er også her helt OK at linjene stokkes om i forhold til det som vises her.

```
   1: /* Program 'primes'
   2:    ----------------
   3:    Finds all prime numbers up to 1000 (using the technique called
   4:    "the sieve of Eratosthenes") and prints them nicely formatted.
   5: */
   6:
   7: #include "/local/opt/inf2100/include/rusc.h"
   8:
   9: int prime[1001];  /* The sieve */
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken prime
Scanner:  leftBracketToken
Scanner:  numberToken 1001
Scanner:  rightBracketToken
Scanner:  semicolonToken
  10: int LF;           /* LF */
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken LF
Scanner:  semicolonToken
  11:
  12: int find_primes ()
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken find_primes
Scanner:  leftParToken
Scanner:  rightParToken
  13: {
Scanner:  leftCurlToken
  14:    /* Remove all non-primes from the sieve: */
  15:
  16:    int i1;  int i2;
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken i1
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken i2
Scanner:  semicolonToken
  17:
  18:    for (i1 = 2;  i1 <= 1000;  i1 = i1+1) {
Scanner:  forToken
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken i1
Scanner:  assignToken
Scanner:  numberToken 2
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken i1
Scanner:  lessEqualToken
Scanner:  numberToken 1000
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken i1
Scanner:  assignToken
Scanner:  nameToken i1
Scanner:  addToken
Scanner:  numberToken 1
Scanner:  rightParToken
Scanner:  leftCurlToken
  19:       for (i2 = 2*i1;  i2 <= 1000;  i2 = i2+i1) {
Scanner:  forToken
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken i2
Scanner:  assignToken
Scanner:  numberToken 2
Scanner:  multiplyToken
Scanner:  nameToken i1
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken i2
Scanner:  lessEqualToken
Scanner:  numberToken 1000
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken i2
Scanner:  assignToken
Scanner:  nameToken i2
Scanner:  addToken
Scanner:  nameToken i1
Scanner:  rightParToken
Scanner:  leftCurlToken
```

Figur 7.4: Loggfil som demonstrerer skanneren (del 1)

```
  20:    prime[i2] = 0;
Scanner:  nameToken prime
Scanner:  leftBracketToken
Scanner:  nameToken i2
Scanner:  rightBracketToken
Scanner:  assignToken
Scanner:  numberToken 0
Scanner:  semicolonToken
  21:       }
Scanner:  rightCurlToken
  22:    }
Scanner:  rightCurlToken
  23: }
Scanner:  rightCurlToken
  24:
  25: int mod (int a, int b)
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken mod
Scanner:  leftParToken
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken a
Scanner:  commaToken
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken b
Scanner:  rightParToken
  26: {
Scanner:  leftCurlToken
  27:    /* Computes a%b. */
  28:
  29:    int ax;
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken ax
Scanner:  semicolonToken
  30:
  31:    ax = a/b;  ax = ax*b;
Scanner:  nameToken ax
Scanner:  assignToken
Scanner:  nameToken a
Scanner:  divideToken
Scanner:  nameToken b
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken ax
Scanner:  assignToken
Scanner:  nameToken ax
Scanner:  multiplyToken
Scanner:  nameToken b
Scanner:  semicolonToken
  32:    return a - ax;
Scanner:  returnToken
Scanner:  nameToken a
Scanner:  subtractToken
Scanner:  nameToken ax
Scanner:  semicolonToken
  33: }
Scanner:  rightCurlToken
  34:
  35: int p3 (int v)
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken p3
Scanner:  leftParToken
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken v
Scanner:  rightParToken
  36: {
Scanner:  leftCurlToken
  37:    /* Does a 'printf("%3d", v)';
  38:       assumes 0<=v<=999. */
  39:
  40:    if (v <= 9) {
Scanner:  ifToken
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken v
Scanner:  lessEqualToken
Scanner:  numberToken 9
Scanner:  rightParToken
```

Figur 7.5: Loggfil som demonstrerer skanneren (del 2)

```
Scanner:  leftCurlToken
  41:       putchar(' ');   putchar(' ');
Scanner:  nameToken putchar
Scanner:  leftParToken
Scanner:  numberToken 32
Scanner:  rightParToken
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken putchar
Scanner:  leftParToken
Scanner:  numberToken 32
Scanner:  rightParToken
Scanner:  semicolonToken
  42:     } else {
Scanner:  rightCurlToken
Scanner:  elseToken
Scanner:  leftCurlToken
  43:       if (v <= 99) {
Scanner:  ifToken
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken v
Scanner:  lessEqualToken
Scanner:  numberToken 99
Scanner:  rightParToken
Scanner:  leftCurlToken
  44:     putchar(' ');
Scanner:  nameToken putchar
Scanner:  leftParToken
Scanner:  numberToken 32
Scanner:  rightParToken
Scanner:  semicolonToken
  45:       };
Scanner:  rightCurlToken
Scanner:  semicolonToken
  46:     }
Scanner:  rightCurlToken
  47:     putint(v);
Scanner:  nameToken putint
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken v
Scanner:  rightParToken
Scanner:  semicolonToken
  48: }
Scanner:  rightCurlToken
  49:
  50: int print_primes ()
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken print_primes
Scanner:  leftParToken
Scanner:  rightParToken
  51: {
Scanner:  leftCurlToken
  52:     /* Print the primes, 10 on each line. */
  53:
  54:     int n_printed;  int i;
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken n_printed
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  semicolonToken
  55:
  56:     n_printed = 0;
Scanner:  nameToken n_printed
Scanner:  assignToken
Scanner:  numberToken 0
Scanner:  semicolonToken
  57:     for (i = 1;  i <= 1000;  i = i + 1) {
Scanner:  forToken
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  assignToken
Scanner:  numberToken 1
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  lessEqualToken
```

Figur 7.6: Loggfil som demonstrerer skanneren (del 3)

```
Scanner:  numberToken 1000
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  assignToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  addToken
Scanner:  numberToken 1
Scanner:  rightParToken
Scanner:  leftCurlToken
  58:       if (prime[i]) {
Scanner:  ifToken
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken prime
Scanner:  leftBracketToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  rightBracketToken
Scanner:  rightParToken
Scanner:  leftCurlToken
  59:    if (mod(n_printed,10) == 0 * n_printed) {
Scanner:  ifToken
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken mod
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken n_printed
Scanner:  commaToken
Scanner:  numberToken 10
Scanner:  rightParToken
Scanner:  equalToken
Scanner:  numberToken 0
Scanner:  multiplyToken
Scanner:  nameToken n_printed
Scanner:  rightParToken
Scanner:  leftCurlToken
  60:       putchar(LF);
Scanner:  nameToken putchar
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken LF
Scanner:  rightParToken
Scanner:  semicolonToken
  61:    }
Scanner:  rightCurlToken
  62:    putchar(' ');   p3(i);   n_printed = n_printed+1;
Scanner:  nameToken putchar
Scanner:  leftParToken
Scanner:  numberToken 32
Scanner:  rightParToken
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken p3
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  rightParToken
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken n_printed
Scanner:  assignToken
Scanner:  nameToken n_printed
Scanner:  addToken
Scanner:  numberToken 1
Scanner:  semicolonToken
  63:       }
Scanner:  rightCurlToken
  64:    }
Scanner:  rightCurlToken
  65:    putchar(LF);
Scanner:  nameToken putchar
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken LF
Scanner:  rightParToken
Scanner:  semicolonToken
  66: }
Scanner:  rightCurlToken
  67:
  68: int main ()
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken main
Scanner:  leftParToken
```

Figur 7.7: Loggfil som demonstrerer skanneren (del 4)

```
Scanner:  rightParToken
  69: {
Scanner:  leftCurlToken
  70:    int i;
Scanner:  intToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  semicolonToken
  71:
  72:    LF = 10;
Scanner:  nameToken LF
Scanner:  assignToken
Scanner:  numberToken 10
Scanner:  semicolonToken
  73:    /* Initialize the sieve by assuming all numbers >1 to be primes: */
  74:    prime[1] = 0;
Scanner:  nameToken prime
Scanner:  leftBracketToken
Scanner:  numberToken 1
Scanner:  rightBracketToken
Scanner:  assignToken
Scanner:  numberToken 0
Scanner:  semicolonToken
  75:    for (i=2; i<=1000; i=i+1) { prime[i] = 1; }
Scanner:  forToken
Scanner:  leftParToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  assignToken
Scanner:  numberToken 2
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  lessEqualToken
Scanner:  numberToken 1000
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  assignToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  addToken
Scanner:  numberToken 1
Scanner:  rightParToken
Scanner:  leftCurlToken
Scanner:  nameToken prime
Scanner:  leftBracketToken
Scanner:  nameToken i
Scanner:  rightBracketToken
Scanner:  assignToken
Scanner:  numberToken 1
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  rightCurlToken
  76:
  77:    /* Find and print the primes: */
  78:    find_primes();  print_primes();
Scanner:  nameToken find_primes
Scanner:  leftParToken
Scanner:  rightParToken
Scanner:  semicolonToken
Scanner:  nameToken print_primes
Scanner:  leftParToken
Scanner:  rightParToken
Scanner:  semicolonToken
  79: }
Scanner:  rightCurlToken
Scanner:  eofToken
Scanner:  eofToken
```

Figur 7.8: Loggfil som demonstrerer skanneren (del 5)

```
1     1: /* Program 'mini'
2     2:    --------------
3     3:    The smallest possible RusC program!
4     4: */
5     5:
6     6: int main ()
7  Parser:   <program>
8  Parser:     <func decl>
9     7: {
10    8: }
11 Parser:       <func body>
12 Parser:         <statm list>
13 Parser:         </statm list>
14 Parser:       </func body>
15 Parser:     </func decl>
16 Parser:   </program>
```

Figur 7.9: Loggfil som demonstrerer parsering av det minimale RusC-programmet vist i figur 7.2 på side 54

```
   1: /* Program 'primes'
   2:    ----------------
   3:    Finds all prime numbers up to 1000 (using the technique called
   4:    "the sieve of Eratosthenes") and prints them nicely formatted.
   5: */
   6:
   7: #include "/local/opt/inf2100/include/rusc.h"
   8:
   9: int prime[1001];  /* The sieve */
Parser:   <program>
Parser:     <var decl>
  10: int LF;           /* LF */
Parser:     </var decl>
Parser:     <var decl>
  11:
  12: int find_primes ()
Parser:     </var decl>
Parser:     <func decl>
  13: {
  14:    /* Remove all non-primes from the sieve: */
  15:
  16:    int i1;  int i2;
Parser:       <func body>
Parser:         <var decl>
Parser:         </var decl>
Parser:         <var decl>
  17:
  18:    for (i1 = 2;  i1 <= 1000;  i1 = i1+1) {
Parser:         </var decl>
Parser:         <statm list>
Parser:           <statement>
Parser:             <for-statm>
Parser:               <assignment>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
Parser:                 <expression>
Parser:                   <number>
Parser:                   </number>
Parser:                 </expression>
Parser:               </assignment>
Parser:               <expression>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
Parser:                 <operator>
Parser:                 </operator>
Parser:                 <number>
Parser:                 </number>
Parser:               </expression>
Parser:               <assignment>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
Parser:                 <expression>
Parser:                   <variable>
Parser:                   </variable>
Parser:                   <operator>
Parser:                   </operator>
Parser:                   <number>
  19:       for (i2 = 2*i1;  i2 <= 1000;  i2 = i2+i1) {
Parser:                   </number>
Parser:                 </expression>
Parser:               </assignment>
Parser:               <statm list>
Parser:                 <statement>
Parser:                   <for-statm>
Parser:                     <assignment>
Parser:                       <variable>
Parser:                       </variable>
Parser:                       <expression>
Parser:                         <number>
Parser:                         </number>
Parser:                         <operator>
Parser:                         </operator>
Parser:                         <variable>
Parser:                         </variable>
Parser:                       </expression>
```

Figur 7.10: Loggfil som demonstrerer parseren (del 1)

```
Parser:                     </assignment>
Parser:                     <expression>
Parser:                       <variable>
Parser:                       </variable>
Parser:                       <operator>
Parser:                       </operator>
Parser:                       <number>
Parser:                       </number>
Parser:                     </expression>
Parser:                     <assignment>
Parser:                       <variable>
Parser:                       </variable>
Parser:                       <expression>
Parser:                         <variable>
Parser:                         </variable>
Parser:                         <operator>
Parser:                         </operator>
Parser:                         <variable>
  20:    prime[i2] = 0;
Parser:                         </variable>
Parser:                       </expression>
Parser:                     </assignment>
Parser:                     <statm list>
Parser:                       <statement>
Parser:                         <assign-statm>
Parser:                           <assignment>
Parser:                             <variable>
Parser:                               <simple expr>
Parser:                                 <name>
Parser:                                 </name>
Parser:                               </simple expr>
Parser:                             </variable>
  21:       }
Parser:                             <expression>
Parser:                               <number>
  22:    }
Parser:                               </number>
Parser:                             </expression>
Parser:                           </assignment>
  23: }
Parser:                         </assign statm>
Parser:                       </statement>
Parser:                     </statm list>
  24:
  25: int mod (int a, int b)
Parser:                   </for-statm>
Parser:                 </statement>
Parser:               </statm list>
Parser:             </for-statm>
Parser:           </statement>
Parser:         </statm list>
Parser:       </func body>
Parser:     </func decl>
Parser:     <func decl>
Parser:       <param decl>
Parser:       </param decl>
Parser:       <param decl>
  26: {
  27:    /* Computes a%b. */
  28:
  29:    int ax;
Parser:       </param decl>
Parser:       <func body>
Parser:         <var decl>
  30:
  31:    ax = a/b;  ax = ax*b;
Parser:         </var decl>
Parser:         <statm list>
Parser:           <statement>
Parser:             <assign-statm>
Parser:               <assignment>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
Parser:                 <expression>
Parser:                   <variable>
```

Figur 7.11: Loggfil som demonstrerer parseren (del 2)

```
151 Parser:                    </variable>
152 Parser:                    <operator>
153 Parser:                    </operator>
154 Parser:                    <variable>
155 Parser:                    </variable>
156 Parser:                  </expression>
157 Parser:                </assignment>
158 Parser:              </assign statm>
159 Parser:            </statement>
160 Parser:            <statement>
161 Parser:              <assign-statm>
162 Parser:                <assignment>
163 Parser:                  <variable>
164 Parser:                  </variable>
165 Parser:                  <expression>
166 Parser:                    <variable>
167 Parser:                    </variable>
168 Parser:                    <operator>
169 Parser:                    </operator>
170   32:    return a - ax;
171 Parser:                    <variable>
172 Parser:                    </variable>
173 Parser:                  </expression>
174 Parser:                </assignment>
175 Parser:              </assign statm>
176 Parser:            </statement>
177 Parser:            <statement>
178 Parser:              <return-statm>
179 Parser:                <expression>
180 Parser:                  <variable>
181 Parser:                  </variable>
182 Parser:                  <operator>
183 Parser:                  </operator>
184   33: }
185 Parser:                  <variable>
186   34:
187   35: int p3 (int v)
188 Parser:                  </variable>
189 Parser:                </expression>
190 Parser:              </return-statm>
191 Parser:            </statement>
192 Parser:          </statm list>
193 Parser:        </func body>
194 Parser:      </func decl>
195 Parser:      <func decl>
196 Parser:        <param decl>
197   36: {
198   37:    /* Does a ‘printf("%3d", v)´;
199   38:       assumes 0<=v<=999. */
200   39:
201   40:    if (v <= 9) {
202 Parser:        </param decl>
203 Parser:        <func body>
204 Parser:          <statm list>
205 Parser:            <statement>
206 Parser:              <if-statm>
207 Parser:                <expression>
208 Parser:                  <variable>
209 Parser:                  </variable>
210 Parser:                  <operator>
211 Parser:                  </operator>
212 Parser:                  <number>
213   41:       putchar(' ');   putchar(' ');
214 Parser:                  </number>
215 Parser:                </expression>
216 Parser:                <statm list>
217 Parser:                  <statement>
218 Parser:                    <call-statm>
219 Parser:                      <function call>
220 Parser:                        <simple expr>
221 Parser:                          <number>
222 Parser:                          </number>
223 Parser:                        </simple expr>
224 Parser:                      </function call>
225 Parser:                    </call-statm>
```

Figur 7.12: Loggfil som demonstrerer parseren (del 3)

```
226 Parser:                 </statement>
227 Parser:                 <statement>
228 Parser:                   <call-statm>
229 Parser:                     <function call>
230 Parser:                       <simple expr>
231 Parser:                         <number>
232   42:    } else {
233 Parser:                         </number>
234 Parser:                       </simple expr>
235 Parser:                     </function call>
236 Parser:                   </call-statm>
237 Parser:                 </statement>
238 Parser:               </statm list>
239   43:        if (v <= 99) {
240 Parser:               <else-part>
241 Parser:                 <statm list>
242 Parser:                   <statement>
243 Parser:                     <if-statm>
244 Parser:                       <expression>
245 Parser:                         <variable>
246 Parser:                         </variable>
247 Parser:                         <operator>
248 Parser:                         </operator>
249 Parser:                         <number>
250   44:    putchar(' ');
251 Parser:                         </number>
252 Parser:                       </expression>
253 Parser:                       <statm list>
254 Parser:                         <statement>
255 Parser:                           <call-statm>
256 Parser:                             <function call>
257 Parser:                               <simple expr>
258 Parser:                                 <number>
259   45:        };
260 Parser:                                 </number>
261 Parser:                               </simple expr>
262 Parser:                             </function call>
263   46:    }
264 Parser:                           </call-statm>
265 Parser:                         </statement>
266 Parser:                       </statm list>
267   47:    putint(v);
268 Parser:                     </if-statm>
269 Parser:                   </statement>
270 Parser:                   <statement>
271 Parser:                     <empty statm>
272 Parser:                     </empty statm>
273 Parser:                   </statement>
274 Parser:                 </statm list>
275 Parser:               </else-part>
276 Parser:             </if-statm>
277 Parser:           </statement>
278 Parser:           <statement>
279 Parser:             <call-statm>
280 Parser:               <function call>
281 Parser:                 <simple expr>
282 Parser:                   <name>
283   48: }
284 Parser:                   </name>
285 Parser:                 </simple expr>
286   49:
287   50: int print_primes ()
288 Parser:               </function call>
289 Parser:             </call-statm>
290 Parser:           </statement>
291 Parser:         </statm list>
292 Parser:       </func body>
293 Parser:     </func decl>
294 Parser:     <func decl>
295   51: {
296   52:    /* Print the primes, 10 on each line. */
297   53:
298   54:    int n_printed;  int i;
299 Parser:       <func body>
300 Parser:         <var decl>
```

Figur 7.13: Loggfil som demonstrerer parseren (del 4)

```
Parser:         </var decl>
Parser:         <var decl>
  55:
  56:    n_printed = 0;
Parser:         </var decl>
Parser:         <statm list>
Parser:           <statement>
Parser:             <assign-statm>
Parser:               <assignment>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
  57:    for (i = 1;  i <= 1000;  i = i + 1) {
Parser:                 <expression>
Parser:                   <number>
Parser:                   </number>
Parser:                 </expression>
Parser:               </assignment>
Parser:             </assign statm>
Parser:           </statement>
Parser:           <statement>
Parser:             <for-statm>
Parser:               <assignment>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
Parser:                 <expression>
Parser:                   <number>
Parser:                   </number>
Parser:                 </expression>
Parser:               </assignment>
Parser:               <expression>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
Parser:                 <operator>
Parser:                 </operator>
Parser:                 <number>
Parser:                 </number>
Parser:               </expression>
Parser:               <assignment>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
Parser:                 <expression>
Parser:                   <variable>
Parser:                   </variable>
Parser:                   <operator>
Parser:                   </operator>
Parser:                   <number>
  58:       if (prime[i]) {
Parser:                   </number>
Parser:                 </expression>
Parser:               </assignment>
Parser:               <statm list>
Parser:                 <statement>
Parser:                   <if-statm>
Parser:                     <expression>
Parser:                       <variable>
Parser:                         <simple expr>
Parser:                           <name>
Parser:                           </name>
Parser:                         </simple expr>
  59:    if (mod(n_printed,10) == 0 * n_printed) {
Parser:                       </variable>
Parser:                     </expression>
Parser:                     <statm list>
Parser:                       <statement>
Parser:                         <if-statm>
Parser:                           <expression>
Parser:                             <function call>
Parser:                               <simple expr>
Parser:                                 <name>
Parser:                                 </name>
Parser:                               </simple expr>
Parser:                               <simple expr>
Parser:                                 <number>
Parser:                                 </number>
Parser:                               </simple expr>
```

Figur 7.14: Loggfil som demonstrerer parseren (del 5)

```
376 Parser:                              </function call>
377 Parser:                              <operator>
378 Parser:                              </operator>
379 Parser:                              <number>
380 Parser:                              </number>
381 Parser:                              <operator>
382 Parser:                              </operator>
383 Parser:                              <variable>
384   60:       putchar(LF);
385 Parser:                              </variable>
386 Parser:                            </expression>
387 Parser:                            <statm list>
388 Parser:                              <statement>
389 Parser:                                <call-statm>
390 Parser:                                  <function call>
391 Parser:                                    <simple expr>
392 Parser:                                      <name>
393   61:    }
394 Parser:                                        </name>
395 Parser:                                    </simple expr>
396   62:    putchar(' ');   p3(i);   n_printed = n_printed+1;
397 Parser:                                      </function call>
398 Parser:                                  </call-statm>
399 Parser:                                </statement>
400 Parser:                            </statm list>
401 Parser:                          </if-statm>
402 Parser:                        </statement>
403 Parser:                        <statement>
404 Parser:                          <call-statm>
405 Parser:                            <function call>
406 Parser:                              <simple expr>
407 Parser:                                <number>
408 Parser:                                </number>
409 Parser:                              </simple expr>
410 Parser:                            </function call>
411 Parser:                          </call-statm>
412 Parser:                        </statement>
413 Parser:                        <statement>
414 Parser:                          <call-statm>
415 Parser:                            <function call>
416 Parser:                              <simple expr>
417 Parser:                                <name>
418 Parser:                                </name>
419 Parser:                              </simple expr>
420 Parser:                            </function call>
421 Parser:                          </call-statm>
422 Parser:                        </statement>
423 Parser:                        <statement>
424 Parser:                          <assign-statm>
425 Parser:                            <assignment>
426 Parser:                              <variable>
427 Parser:                              </variable>
428 Parser:                              <expression>
429 Parser:                                <variable>
430 Parser:                                </variable>
431 Parser:                                <operator>
432 Parser:                                </operator>
433   63:       }
434 Parser:                                <number>
435   64:    }
436 Parser:                                </number>
437 Parser:                              </expression>
438 Parser:                            </assignment>
439   65:    putchar(LF);
440 Parser:                          </assign statm>
441 Parser:                        </statement>
442 Parser:                      </statm list>
443 Parser:                    </if-statm>
444 Parser:                  </statement>
445 Parser:                </statm list>
446 Parser:              </for-statm>
447 Parser:            </statement>
448 Parser:            <statement>
449 Parser:              <call-statm>
450 Parser:                <function call>
```

Figur 7.15: Loggfil som demonstrerer parseren (del 6)

```
Parser:                 <simple expr>
Parser:                   <name>
  66: }
Parser:                   </name>
Parser:                 </simple expr>
  67:
  68: int main ()
Parser:               </function call>
Parser:             </call-statm>
Parser:           </statement>
Parser:         </statm list>
Parser:       </func body>
Parser:     </func decl>
Parser:     <func decl>
  69: {
  70:   int i;
Parser:       <func body>
Parser:         <var decl>
  71:
  72:   LF = 10;
Parser:         </var decl>
Parser:         <statm list>
Parser:           <statement>
Parser:             <assign-statm>
Parser:               <assignment>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
  73:   /* Initialize the sieve by assuming all numbers >1 to be primes: */
  74:   prime[1] = 0;
Parser:                 <expression>
Parser:                   <number>
Parser:                   </number>
Parser:                 </expression>
Parser:               </assignment>
Parser:             </assign statm>
Parser:           </statement>
Parser:           <statement>
Parser:             <assign-statm>
Parser:               <assignment>
Parser:                 <variable>
Parser:                   <simple expr>
Parser:                     <number>
Parser:                     </number>
Parser:                   </simple expr>
Parser:                 </variable>
  75:   for (i=2; i<=1000; i=i+1) { prime[i] = 1; }
Parser:                 <expression>
Parser:                   <number>
Parser:                   </number>
Parser:                 </expression>
Parser:               </assignment>
Parser:             </assign statm>
Parser:           </statement>
Parser:           <statement>
Parser:             <for-statm>
Parser:               <assignment>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
Parser:                 <expression>
Parser:                   <number>
Parser:                   </number>
Parser:                 </expression>
Parser:               </assignment>
Parser:               <expression>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
Parser:                 <operator>
Parser:                 </operator>
Parser:                 <number>
Parser:                 </number>
Parser:               </expression>
Parser:               <assignment>
Parser:                 <variable>
Parser:                 </variable>
Parser:                 <expression>
```

Figur 7.16: Loggfil som demonstrerer parseren (del 7)

```
Parser:                    <variable>
Parser:                    </variable>
Parser:                    <operator>
Parser:                    </operator>
Parser:                    <number>
Parser:                    </number>
Parser:                  </expression>
Parser:                </assignment>
Parser:                <statm list>
Parser:                  <statement>
Parser:                    <assign-statm>
Parser:                      <assignment>
Parser:                        <variable>
Parser:                          <simple expr>
Parser:                            <name>
Parser:                            </name>
Parser:                          </simple expr>
Parser:                        </variable>
Parser:                        <expression>
Parser:                          <number>
  76:
  77:    /* Find and print the primes: */
  78:    find_primes();  print_primes();
Parser:                          </number>
Parser:                        </expression>
Parser:                      </assignment>
Parser:                    </assign statm>
Parser:                  </statement>
Parser:                </statm list>
Parser:              </for-statm>
Parser:            </statement>
Parser:            <statement>
Parser:              <call-statm>
Parser:                <function call>
Parser:                </function call>
Parser:              </call-statm>
Parser:            </statement>
Parser:            <statement>
Parser:              <call-statm>
Parser:                <function call>
  79: }
Parser:                </function call>
Parser:              </call-statm>
Parser:            </statement>
Parser:          </statm list>
Parser:        </func body>
Parser:      </func decl>
Parser:    </program>
```

Figur 7.17: Loggfil som demonstrerer parseren (del 8)

```
Code    0: 1600000000000000  CALL      0  0          0  # main();
Code    1:  211000000000000  SET      11  0          0  #     (0)
Code    2: 1600000000009990  CALL      0  0       9990  # exit
Code    3:                   RES                    1  # Return address in main
Code    4:                   RES                    1  # Refuge for R3 in main
Code    5:  331000000000003  STORE    31  0          3  # Save return address
Code    6:  303000000000004  STORE     3  0          4  # Save R3
Code    7:  103000000000004  LOAD      3  0          4  # Restore R3
Code    8:  131000000000003  LOAD     31  0          3  # Restore return address
Code    9: 1700000000000000  RET       0  0          0  # Return from main
--->    0: 1600000000000005                         5  # Fix call to main()
```

Figur 7.18: Loggfil som demonstrerer kodegenereringen for det minimale RusC-programmet vist i figur 7.2 på side 54

```
1  Code    0: 1600000000000000  CALL      0  0          0  # main();
2  Code    1:  211000000000000  SET      11  0          0  #     (0)
3  Code    2: 1600000000009990  CALL      0  0       9990  # exit
4  Code    3:                   RES                  1001  # int prime[1001]
5  Code 1004:                   RES                     1  # int LF
6  Code 1005:                   RES                     1  # Return address in find_primes
7  Code 1006:                   RES                     1  # Refuge for R3 in find_primes
8  Code 1007:                   RES                     1  # int i1
9  Code 1008:                   RES                     1  # int i2
10 Code 1009:  331000000001005  STORE    31  0       1005  # Save return address
11 Code 1010:  303000000001006  STORE     3  0       1006  # Save R3
12 Code 1011:  201000000000002  SET       1  0          2  # R1 = 2
13 Code 1012:  301000000001007  STORE     1  0       1007  # i1 =
14 Code 1013:  101000000001007  LOAD      1  0       1007  # R1 = i1
15 Code 1014:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
16 Code 1015:  201000000001000  SET       1  0       1000  # R1 = 1000
17 Code 1016: 1101030000000001  LESSEQ    1  3          1  #   <=
18 Code 1017: 1401000000000000  JUMPEQ     1  0          0  # if for-test is false, exit
19 Code 1018:  201000000000002  SET       1  0          2  # R1 = 2
20 Code 1019:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
21 Code 1020:  101000000001007  LOAD      1  0       1007  # R1 = i1
22 Code 1021:  601030000000001  MUL       1  3          1  #   *
23 Code 1022:  301000000001008  STORE     1  0       1008  # i2 =
24 Code 1023:  101000000001008  LOAD      1  0       1008  # R1 = i2
25 Code 1024:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
26 Code 1025:  201000000001000  SET       1  0       1000  # R1 = 1000
27 Code 1026: 1101030000000001  LESSEQ    1  3          1  #   <=
28 Code 1027: 1401000000000000  JUMPEQ     1  0          0  # if for-test is false, exit
29 Code 1028:  201000000000000  SET       1  0          0  # R1 = 0
30 Code 1029:  102000000001008  LOAD      2  0       1008  # R2 = i2
31 Code 1030:  301020000000003  STORE     1  2          3  # prime[...] =
32 Code 1031:  101000000001008  LOAD      1  0       1008  # R1 = i2
33 Code 1032:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
34 Code 1033:  101000000001007  LOAD      1  0       1007  # R1 = i1
35 Code 1034:  401030000000001  ADD       1  3          1  #   +
36 Code 1035:  301000000001008  STORE     1  0       1008  # i2 =
37 Code 1036: 1400000000001023  JUMPEQ     0  0       1023  # repeat test in for-test
38 ---> 1027: 1401000000001037                       1037  # Update address of for exit
39 Code 1037:  101000000001007  LOAD      1  0       1007  # R1 = i1
40 Code 1038:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
41 Code 1039:  201000000000001  SET       1  0          1  # R1 = 1
42 Code 1040:  401030000000001  ADD       1  3          1  #   +
43 Code 1041:  301000000001007  STORE     1  0       1007  # i1 =
44 Code 1042: 1400000000001013  JUMPEQ     0  0       1013  # repeat test in for-test
45 ---> 1017: 1401000000001043                       1043  # Update address of for exit
46 Code 1043:  103000000001006  LOAD      3  0       1006  # Restore R3
47 Code 1044:  131000000001005  LOAD     31  0       1005  # Restore return address
48 Code 1045: 1700000000000000  RET       0  0          0  # Return from find_primes
49 Code 1046:                   RES                     1  # Return address in mod
50 Code 1047:                   RES                     1  # Refuge for R3 in mod
51 Code 1048:                   RES                     1  # int a
52 Code 1049:                   RES                     1  # int b
53 Code 1050:                   RES                     1  # int ax
54 Code 1051:  331000000001046  STORE    31  0       1046  # Save return address
55 Code 1052:  303000000001047  STORE     3  0       1047  # Save R3
56 Code 1053:  311000000001048  STORE    11  0       1048  # Save parameter a
57 Code 1054:  312000000001049  STORE    12  0       1049  # Save parameter b
58 Code 1055:  101000000001048  LOAD      1  0       1048  # R1 = a
59 Code 1056:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
60 Code 1057:  101000000001049  LOAD      1  0       1049  # R1 = b
61 Code 1058:  701030000000001  DIV       1  3          1  #   /
62 Code 1059:  301000000001050  STORE     1  0       1050  # ax =
63 Code 1060:  101000000001050  LOAD      1  0       1050  # R1 = ax
64 Code 1061:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
65 Code 1062:  101000000001049  LOAD      1  0       1049  # R1 = b
66 Code 1063:  601030000000001  MUL       1  3          1  #   *
67 Code 1064:  301000000001050  STORE     1  0       1050  # ax =
68 Code 1065:  101000000001048  LOAD      1  0       1048  # R1 = a
69 Code 1066:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
70 Code 1067:  101000000001050  LOAD      1  0       1050  # R1 = ax
71 Code 1068:  501030000000001  SUB       1  3          1  #   -
72 Code 1069: 1400000000000000  JUMPEQ     0  0          0  # return
73 ---> 1069: 1400000000001070                       1070  # Update address of return jump
74 Code 1070:  103000000001047  LOAD      3  0       1047  # Restore R3
75 Code 1071:  131000000001046  LOAD     31  0       1046  # Restore return address
```

Figur 7.19: Loggfil som demonstrerer kodegenereringen (del 1)

```
76  Code 1072: 1700000000000000  RET       0  0          0  # Return from mod
77  Code 1073:                   RES                     1  # Return address in p3
78  Code 1074:                   RES                     1  # Refuge for R3 in p3
79  Code 1075:                   RES                     1  # int v
80  Code 1076:  331000000001073  STORE    31  0       1073  # Save return address
81  Code 1077:  303000000001074  STORE     3  0       1074  # Save R3
82  Code 1078:  311000000001075  STORE    11  0       1075  # Save parameter v
83  Code 1079:  101000000001075  LOAD      1  0       1075  # R1 = v
84  Code 1080:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
85  Code 1081:  201000000000009  SET       1  0          9  # R1 = 9
86  Code 1082: 1101030000000001  LESSEQ    1  3          1  #   <=
87  Code 1083: 1401000000000000  JUMPEQ    1  0          0  # When if-test is false, jump
88  Code 1084:  211000000000032  SET      11  0         32  # R11 = 32
89  Code 1085: 1600000000009993  CALL      0  0       9993  # Call putchar(...)
90  Code 1086:  211000000000032  SET      11  0         32  # R11 = 32
91  Code 1087: 1600000000009993  CALL      0  0       9993  # Call putchar(...)
92  Code 1088: 1400000000000000  JUMPEQ    0  0          0  # ...end of then part
93  ---> 1083: 1401000000001089                       1089  # Update jump address 1
94  Code 1089:  101000000001075  LOAD      1  0       1075  # R1 = v
95  Code 1090:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
96  Code 1091:  201000000000099  SET       1  0         99  # R1 = 99
97  Code 1092: 1101030000000001  LESSEQ    1  3          1  #   <=
98  Code 1093: 1401000000000000  JUMPEQ    1  0          0  # When if-test is false, jump
99  Code 1094:  211000000000032  SET      11  0         32  # R11 = 32
100 Code 1095: 1600000000009993  CALL      0  0       9993  # Call putchar(...)
101 ---> 1093: 1401000000001096                       1096  # Update jump address
102 ---> 1088: 1400000000001096                       1096  # Update jump address 2
103 Code 1096:  111000000001075  LOAD     11  0       1075  # R11 = v
104 Code 1097: 1600000000009994  CALL      0  0       9994  # Call putint(...)
105 Code 1098:  103000000001074  LOAD      3  0       1074  # Restore R3
106 Code 1099:  131000000001073  LOAD     31  0       1073  # Restore return address
107 Code 1100: 1700000000000000  RET       0  0          0  # Return from p3
108 Code 1101:                   RES                     1  # Return address in print_primes
109 Code 1102:                   RES                     1  # Refuge for R3 in print_primes
110 Code 1103:                   RES                     1  # int n_printed
111 Code 1104:                   RES                     1  # int i
112 Code 1105:  331000000001101  STORE    31  0       1101  # Save return address
113 Code 1106:  303000000001102  STORE     3  0       1102  # Save R3
114 Code 1107:  201000000000000  SET       1  0          0  # R1 = 0
115 Code 1108:  301000000001103  STORE     1  0       1103  # n_printed =
116 Code 1109:  201000000000001  SET       1  0          1  # R1 = 1
117 Code 1110:  301000000001104  STORE     1  0       1104  # i =
118 Code 1111:  101000000001104  LOAD      1  0       1104  # R1 = i
119 Code 1112:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
120 Code 1113:  201000000001000  SET       1  0       1000  # R1 = 1000
121 Code 1114: 1101030000000001  LESSEQ    1  3          1  #   <=
122 Code 1115: 1401000000000000  JUMPEQ    1  0          0  # if for-test is false, exit
123 Code 1116:  102000000001104  LOAD      2  0       1104  # R2 = i
124 Code 1117:  101020000000003  LOAD      1  2          3  # prime[...]
125 Code 1118: 1401000000000000  JUMPEQ    1  0          0  # When if-test is false, jump
126 Code 1119:  111000000001103  LOAD     11  0       1103  # R11 = n_printed
127 Code 1120:  212000000000010  SET      12  0         10  # R12 = 10
128 Code 1121: 1600000000001051  CALL      0  0       1051  # Call mod(...)
129 Code 1122:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
130 Code 1123:  201000000000000  SET       1  0          0  # R1 = 0
131 Code 1124:  801030000000001  EQ        1  3          1  #   ==
132 Code 1125:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
133 Code 1126:  101000000001103  LOAD      1  0       1103  # R1 = n_printed
134 Code 1127:  601030000000001  MUL       1  3          1  #   *
135 Code 1128: 1401000000000000  JUMPEQ    1  0          0  # When if-test is false, jump
136 Code 1129:  111000000001004  LOAD     11  0       1004  # R11 = LF
137 Code 1130: 1600000000009993  CALL      0  0       9993  # Call putchar(...)
138 ---> 1128: 1401000000001131                       1131  # Update jump address
139 Code 1131:  211000000000032  SET      11  0         32  # R11 = 32
140 Code 1132: 1600000000009993  CALL      0  0       9993  # Call putchar(...)
141 Code 1133:  111000000001104  LOAD     11  0       1104  # R11 = i
142 Code 1134: 1600000000001076  CALL      0  0       1076  # Call p3(...)
143 Code 1135:  101000000001103  LOAD      1  0       1103  # R1 = n_printed
144 Code 1136:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
145 Code 1137:  201000000000001  SET       1  0          1  # R1 = 1
146 Code 1138:  401030000000001  ADD       1  3          1  #   +
147 Code 1139:  301000000001103  STORE     1  0       1103  # n_printed =
148 ---> 1118: 1401000000001140                       1140  # Update jump address
149 Code 1140:  101000000001104  LOAD      1  0       1104  # R1 = i
150 Code 1141:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
```

Figur 7.20: Loggfil som demonstrerer kodegenereringen (del 2)

```
151 Code 1142:  201000000000001  SET       1  0          1  # R1 = 1
152 Code 1143:  401030000000001  ADD       1  3          1  #   +
153 Code 1144:  301000000001104  STORE     1  0       1104  # i =
154 Code 1145: 1400000000001111  JUMPEQ    0  0       1111  # repeat test in for-test
155 ---> 1115: 1401000000001146                       1146  # Update address of for exit
156 Code 1146:  111000000001004  LOAD     11  0       1004  # R11 = LF
157 Code 1147: 1600000000009993  CALL      0  0       9993  # Call putchar(...)
158 Code 1148:  103000000001102  LOAD      3  0       1102  # Restore R3
159 Code 1149:  131000000001101  LOAD     31  0       1101  # Restore return address
160 Code 1150: 1700000000000000  RET       0  0          0  # Return from print_primes
161 Code 1151:                   RES                    1  # Return address in main
162 Code 1152:                   RES                    1  # Refuge for R3 in main
163 Code 1153:                   RES                    1  # int i
164 Code 1154:  331000000001151  STORE    31  0       1151  # Save return address
165 Code 1155:  303000000001152  STORE     3  0       1152  # Save R3
166 Code 1156:  201000000000010  SET       1  0         10  # R1 = 10
167 Code 1157:  301000000001004  STORE     1  0       1004  # LF =
168 Code 1158:  201000000000000  SET       1  0          0  # R1 = 0
169 Code 1159:  202000000000001  SET       2  0          1  # R2 = 1
170 Code 1160:  301020000000003  STORE     1  2          3  # prime[...] =
171 Code 1161:  201000000000002  SET       1  0          2  # R1 = 2
172 Code 1162:  301000000001153  STORE     1  0       1153  # i =
173 Code 1163:  101000000001153  LOAD      1  0       1153  # R1 = i
174 Code 1164:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
175 Code 1165:  201000000001000  SET       1  0       1000  # R1 = 1000
176 Code 1166: 1101030000000001  LESSEQ    1  3          1  #   <=
177 Code 1167: 1401000000000000  JUMPEQ    1  0          0  # if for-test is false, exit
178 Code 1168:  201000000000001  SET       1  0          1  # R1 = 1
179 Code 1169:  102000000001153  LOAD      2  0       1153  # R2 = i
180 Code 1170:  301020000000003  STORE     1  2          3  # prime[...] =
181 Code 1171:  101000000001153  LOAD      1  0       1153  # R1 = i
182 Code 1172:  203010000000000  SET       3  1          0  # Save operand in R3
183 Code 1173:  201000000000001  SET       1  0          1  # R1 = 1
184 Code 1174:  401030000000001  ADD       1  3          1  #   +
185 Code 1175:  301000000001153  STORE     1  0       1153  # i =
186 Code 1176: 1400000000001163  JUMPEQ    0  0       1163  # repeat test in for-test
187 ---> 1167: 1401000000001177                       1177  # Update address of for exit
188 Code 1177: 1600000000001009  CALL      0  0       1009  # Call find_primes(...)
189 Code 1178: 1600000000001105  CALL      0  0       1105  # Call print_primes(...)
190 Code 1179:  103000000001152  LOAD      3  0       1152  # Restore R3
191 Code 1180:  131000000001151  LOAD     31  0       1151  # Restore return address
192 Code 1181: 1700000000000000  RET       0  0          0  # Return from main
193 --->    0: 1600000000001154                       1154  # Fix call to main()
```

Figur 7.21: Loggfil som demonstrerer kodegenereringen (del 3)

Kapittel 8

Koding

8.1 SUNs anbefalte Java-stil

Datafirmaet Sun, som utviklet Java, har også tanker om hvorledes Java-koden bør se ut. Dette er uttrykt i et lite skriv på 24 sider som kan hentes fra http://java.sun.com/docs/codeconv/CodeConventions.pdf. Her er hovedpunktene.

8.1.1 Klasser

Hver klasse bør ligge i sin egen kildefil; unntatt er private klasser som «tilhører» en vanlig klasse.

Klasse-filer bør inneholde følgende (i denne rekkefølgen):

1) En kommentar med de aller viktigste opplysningene om filen:

```
1  /*
2   * Klassens navn
3   *
4   * Versjonsinformasjon
5   *
6   * Copyrightangivelse
7   */
```

2) Alle `import`-spesifikasjonene.

3) JavaDoc-kommentar for klassen. (JavaDoc er beskrevet i avsnitt 9.1 på side 77.)

4) Selve klassen.

8.1.2 Variabler

Variabler bør deklareres én og én på hver linje:

```
1  int level;
2  int size;
```

De bør komme først i `{}`-blokken (dvs før alle setningene), men lokale `for`-indekser er helt OK:

Type navn	Kapitalisering	Hva slags ord	Eksempel
Klasser	XxxxXxxx	Substantiv som beskriver objektene	`IfStatement`
Metoder	xxxxXxxx	Verb som angir hva metoden gjør	`readToken`
Variabler	xxxxXxxx	Korte substantiver; «bruk-og-kast-variabler» kan være på én bokstav	`curToken`, `i`
Konstanter	XXXX_XX	Substantiv	`MAX_MEMORY`

Tabell 8.1: Suns forslag til navnevalg i Java-programmer

```
1 for (int i = 1;  i <= 10;  ++i) {
2     ...
3 }
```

Om man kan initialisere variablene samtidig med deklarasjonen, er det er fordel.

8.1.3 Setninger

Enkle setninger bør stå én og én på hver linje:

```
1 i = 1;
2 j = 2;
```

De ulike sammensatte setningene skal se ut som vist i figur 8.1 på neste side.

De skal alltid har {} rundt innmaten, og innmaten skal indenteres 4 posisjoner.

8.1.4 Navn

Navn bør velges slik det er angitt i tabell 8.1.

8.1.5 Utseende

8.1.5.1 Linjelengde og linjedeling

Linjene bør ikke være mer enn 80 tegn lange, og kommentarer ikke lenger enn 70 tegn.

En linje som er for lang bør deles

- etter et komma eller
- før en operator (som + eller &&).

Linjedelen etter delingspunktet bør indenteres likt med starten av uttrykket som ble delt.

```
do {
    setninger;
} while (uttrykk);

for (init;  betingelse;  oppdatering) {
    setninger;
}

if (uttrykk) {
    setninger;
}

if (uttrykk) {
    setninger;
} else {
    setninger;
}

if (uttykk) {
    setninger;
} else if (uttrykk) {
    setninger;
} else if (uttrykk) {
    setninger;
}

return uttrykk;

switch (uttrykk) {
case xxx:
   setninger;
   break;

case xxx:
    setninger;
    break;

default:
    setninger;
    break;
}

try {
    setninger;
} catch (ExceptionClass e) {
    setninger;
}

while (uttrykk) {
    setninger;
}
```

Figur 8.1: Suns forslag til hvordan setninger bør skrives

8.1.5.2 Blanke linjer

Sett inn doble blanke linjer

- mellom klasser.

Sett inn enkle blanke linjer

- mellom metoder,
- mellom variabeldeklarasjonene og første setning i metoder eller
- mellom ulike deler av en metode.

8.1.5.3 Blanke tegn

Sett inn blanke

- etter kommaer i parameterlister,
- rundt binære operatorer:

```
1 if (x < a + 1) {
```

(men ikke etter unære operatorer: `-a`)

- ved typekonvertering:

```
1 (int) x
```

Kapittel 9

Dokumentasjon

9.1 JavaDoc

Sun har også laget et opplegg for dokumentasjon av programmer. Hovedtankene er

1) Brukeren skriver kommentarer i hver Java-pakke, -klasse og -metode i henhold til visse regler.
2) Et eget program `javadoc` leser kodefilene og bygger opp et helt nett av HTML-filer med dokumentasjonen.

Et typisk eksempel på JavaDoc-dokumentasjon er den som beskriver Javas enorme bilbliotek: http://java.sun.com/javase/6/docs/api/.

9.1.1 Hvordan skrive JavaDoc-kommentarer

Det er ikke vanskelig å skrive JavaDoc-kommentarer. Her er en kort innføring; den fulle beskrivelsen finnes på nettsiden http://java.sun.com/j2se/javadoc/writingdoccomments/.

En JavaDoc-kommentarer for en klasse ser slik ut:

```
1  /**
2   * kommentarer
3   * kommentarer
4   *      ⋮
5   * @author  navn
6   * @author  navn
7   * @version dato
8   */
```

Legg spesielt merke til den doble stjernen på første linje – det er den som angir at dette er en JavaDoc-kommentar og ikke bare en vanlig kommentar.

JavaDoc-kommentarer for metoder følger nesten samme oppsettet:

```
1  /**
2   * Én setning som kort beskriver klassen/metoden
3   * Ytterligere kommentarer
4   *      ⋮
5   * @param  navn1 Én-linjes beskrivelse av parameteren
```

```
/**
 * Returns an Image object that can then be painted on the screen.
 * The url argument must specify an absolute {@link URL}. The name
 * argument is a specifier that is relative to the url argument.
 * <p>
 * This method always returns immediately, whether or not the
 * image exists. When this applet attempts to draw the image on
 * the screen, the data will be loaded. The graphics primitives
 * that draw the image will incrementally paint on the screen.
 *
 * @param  url  an absolute URL giving the base location of the image
 * @param  name the location of the image, relative to the url argument
 * @return      the image at the specified URL
 * @see         Image
 */
public Image getImage(URL url, String name) {
    try {
        return getImage(new URL(url, name));
    } catch (MalformedURLException e) {
        return null;
    }
}
```

Figur 9.1: Java-kode med JavaDoc-kommentarer

```
 * @param  navn2 Én-linjes beskrivelse av parameteren
 * @return Én-linjes beskrivelse av returverdien
 * @see    navn3
 */
```

Her er det viktig at den første setningen kort og presist forteller hva metoden gjør. Denne setningen vil bli brukt i metodeoversikten.

Ellers er verdt å merke seg at kommentaren skrives i HTML-kode så man kan bruke konstruksjoner som `<i>...</i>` eller `<table>...</table>` om man ønsker det.

9.1.2 Eksempel

I figur 9.1 kan vi se en Java-metode med dokumentasjon.

9.2 «Lesbar programmering»

Lesbar programmering («literate programmering») er oppfunnet av Donald Knuth, forfatteren av *The art of computer programming* og opphavsmannen til TEX. Hovedtanken er at programmer først og fremst skal skrives slik at mennesker kan lese dem; datamaskiner klarer å «forstå» alt så lenge programmet er korrekt. Dette innebærer følgende:

- Programkoden og dokumentasjonen skrives som en enhet.
- Programmet deles opp i passende små navngitte enheter som legges inn i dokumentasjonen. Slike enheter kan referere til andre enheter.
- Programmet skrives i den rekkefølgen som er enklest for leseren å forstå.
- Dokumentasjonen skrives i et dokumentasjonsspråk (som LATEX) og kan benytte alle tilgjengelige typografiske hjelpemidler som figurer, matematiske formler, fotnoter, kapittelinndeling, fontskifte og annet.

- Det kan automatisk lages oversikter og klasser, funksjoner og variabler: hvor de deklareres og hvor de brukes.

Utifra kildekoden («web-koden») kan man så lage

1) en dokument som kan skrives ut og
2) en kompilerbar kildekode.

9.2.1 Et eksempel

Som eksempel skal vi bruke en implementasjon av boblesortering. Fremgangsmåten er som følger:

1) Skriv kildefilen `bubble.w0` (vist i figur 9.2 og 9.3). Dette gjøres med en vanlig tekstbehandler som for eksempel Emacs.
2) Bruk programmet `weave0`[1] til å lage det ferdige dokumentet som er vist i figur 9.4–9.7:

```
1 weave0 -l c -e -o bubble.tex bubble.w0
2 ltx2pdf bubble.tex
```

3) Bruke `tangle0` til å lage et kjørbart program:

```
1 tangle0 -o bubble.c bubble.w0
2 gcc -c bubble.c
```

[1] Dette eksemplet bruker Dags versjon av lesbar programmering kalt web_0; for mer informasjon, se /local/opt/web0/doc/web0.pdf.

bubble.w0 del 1

```
\documentclass[12pt,a4paper]{webzero}
\usepackage[latin1]{inputenc}
\usepackage[T1]{fontenc}
\usepackage{amssymb,mathpazo,textcomp}

\title{Bubble sort}
\author{Dag Langmyhr\\ Department of Informatics\\
  University of Oslo\\[5pt] \texttt{dag@ifi.uio.no}}

\begin{document}
\maketitle

\noindent This short article describes \emph{bubble
  sort}, which quite probably is the easiest sorting
method to understand and implement.
Although far from being the most efficient one, it is
useful as an example when teaching sorting algorithms.

Let us write a function \texttt{bubble} in C which sorts
an array \texttt{a} with \texttt{n} elements. In other
words, the array \texttt{a} should satisfy the following
condition when \texttt{bubble} exits:
\[
  \forall i, j \in \mathbb{N}: 0 \leq i < j < \mathtt{n}
  \Rightarrow \mathtt{a}[i] \leq \mathtt{a}[j]
\]


<<bubble sort>>=
void bubble(int a[], int n)
{
  <<local variables>>

  <<use bubble sort>>
}
@
Bubble sorting is done by making several passes through
the array, each time letting the larger elements
``bubble'' up. This is repeated until the array is
completely sorted.

<<use bubble sort>>=
do {
  <<perform bubbling>>
} while (<<not sorted>>);
@
```

Figur 9.2: «Lesbar programmering» — kildefilen bubble.w0 del 1

bubble.w0 del 2

```
Each pass through the array consists of looking at
every pair of adjacent elements;\footnote{We could, on the
  average, double the execution speed of \texttt{bubble} by
  reducing the range of the \texttt{for}-loop by~1 each time.
  Since a simple implementation is the main issue, however,
  this improvement was omitted.} if the two are in
the wrong sorting order, they are swapped:
<<perform bubbling>>=
<<initialize>>
for (i=0; i<n-1; ++i)
  if (a[i]>a[i+1]) { <<swap a[i] and a[i+1]>> }
@
The \texttt{for}-loop needs an index variable
\texttt{i}:

<<local var...>>=
int i;
@
Swapping two array elements is done in the standard way
using an auxiliary variable \texttt{temp}. We also
increment a swap counter named \texttt{n\_swaps}.

<<swap ...>>=
temp = a[i];  a[i] = a[i+1];  a[i+1] = temp;
++n_swaps;
@
The variables \texttt{temp} and \texttt{n\_swaps}
must also be declared:

<<local var...>>=
int temp, n_swaps;
@
The variable \texttt{n\_swaps} counts the number of
swaps performed during one ``bubbling'' pass.
It must be initialized prior to each pass.

<<initialize>>=
n_swaps = 0;
@
If no swaps were made during the ``bubbling'' pass,
the array is sorted.

<<not sorted>>=
n_swaps > 0
@

\wzvarindex  \wzmetaindex
\end{document}
```

Figur 9.3: «Lesbar programmering» — kildefilen bubble.w0 del 2

Bubble sort

Dag Langmyhr
Department of Informatics
University of Oslo
dag@ifi.uio.no

August 8, 2008

This short article describes *bubble sort*, which quite probably is the easiest sorting method to understand and implement. Although far from being the most efficient one, it is useful as an example when teaching sorting algorithms.

Let us write a function `bubble` in C which sorts an array `a` with `n` elements. In other words, the array `a` should satisfy the following condition when `bubble` exits:

$$\forall i, j \in \mathbb{N} : 0 \le i < j < \mathtt{n} \Rightarrow \mathtt{a}[i] \le \mathtt{a}[j]$$

#1 ⟨*bubble sort*⟩ ≡

```
1  void bubble(int a[], int n)
2  {
3      ⟨local variables #4 (p.1)⟩
4
5      ⟨use bubble sort #2 (p.1)⟩
6  }
```

(This code is not used.)

Bubble sorting is done by making several passes through the array, each time letting the larger elements "bubble" up. This is repeated until the array is completely sorted.

#2 ⟨*use bubble sort*⟩ ≡

```
7  do {
8      ⟨perform bubbling #3 (p.1)⟩
9  } while (⟨not sorted #7 (p.2)⟩);
```

(This code is used in #1 (p.1).)

Each pass through the array consists of looking at every pair of adjacent elements;[1] if the two are in the wrong sorting order, they are swapped:

#3 ⟨*perform bubbling*⟩ ≡

```
10 ⟨initialize #6 (p.2)⟩
11 for (i=0; i<n-1; ++i)
12     if (a[i]>a[i+1]) { ⟨swap a[i] and a[i+1] #5 (p.2)⟩ }
```

(This code is used in #2 (p.1).)

The `for`-loop needs an index variable `i`:

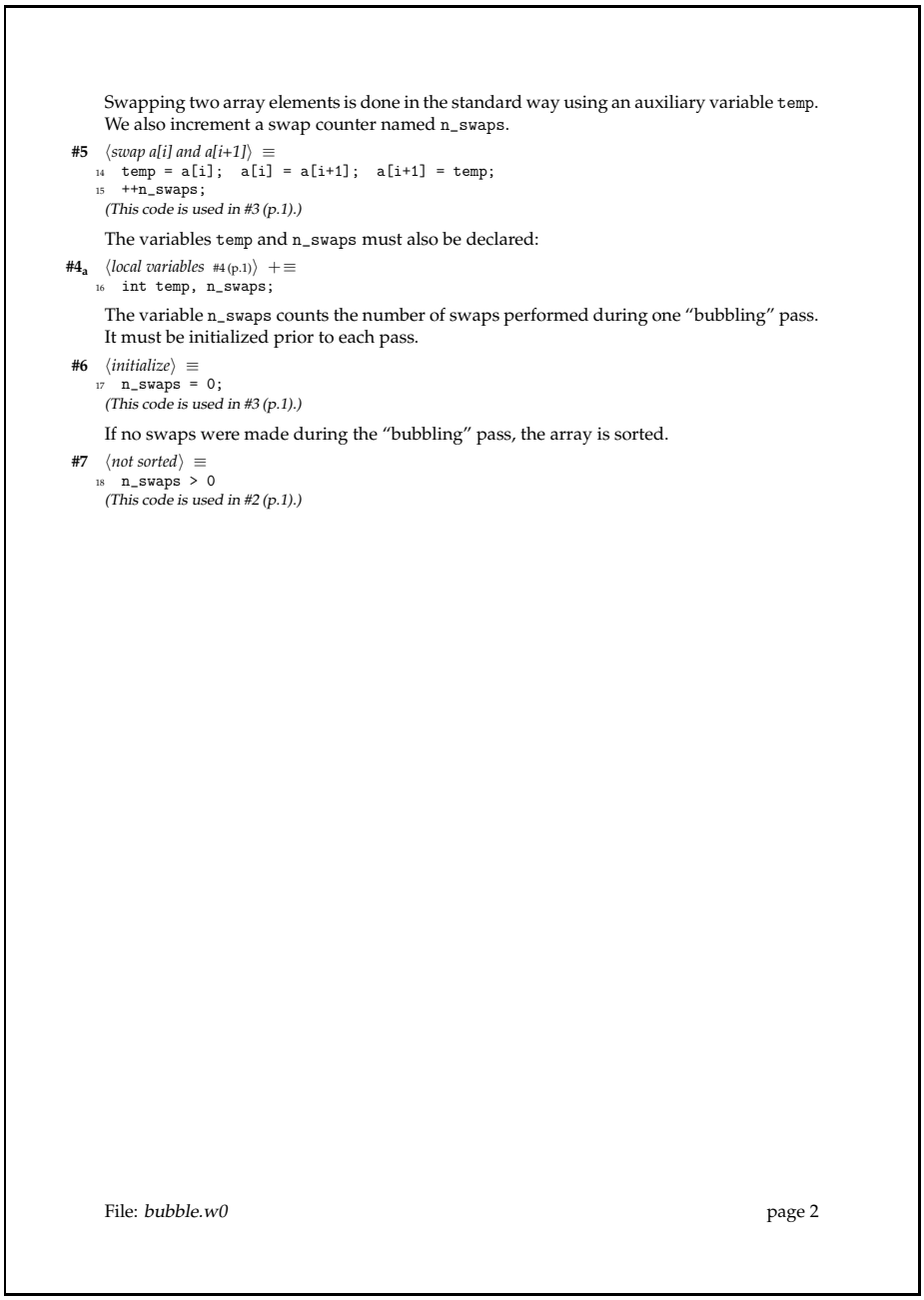
#4 ⟨*local variables*⟩ ≡

```
13 int i;
```

(This code is extended in #4a (p.2). It is used in #1 (p.1).)

[1] We could, on the average, double the execution speed of `bubble` by reducing the range of the `for`-loop by 1 each time. Since a simple implementation is the main issue, however, this improvement was omitted.

Figur 9.4: «Lesbar programmering» — utskrift side 1



Swapping two array elements is done in the standard way using an auxiliary variable `temp`. We also increment a swap counter named `n_swaps`.

#5 ⟨*swap a[i] and a[i+1]*⟩ ≡

```
14  temp = a[i];  a[i] = a[i+1];  a[i+1] = temp;
15  ++n_swaps;
```

(This code is used in #3 (p.1).)

The variables `temp` and `n_swaps` must also be declared:

#4a ⟨*local variables* #4 (p.1)⟩ +≡

```
16  int temp, n_swaps;
```

The variable `n_swaps` counts the number of swaps performed during one "bubbling" pass. It must be initialized prior to each pass.

#6 ⟨*initialize*⟩ ≡

```
17  n_swaps = 0;
```

(This code is used in #3 (p.1).)

If no swaps were made during the "bubbling" pass, the array is sorted.

#7 ⟨*not sorted*⟩ ≡

```
18  n_swaps > 0
```

(This code is used in #2 (p.1).)

File: *bubble.w0* page 2

Figur 9.5: «Lesbar programmering» — utskrift side 2

Variables

A

a 1, 12, 14

I

i 11, 12, 13, 14

N

n 1, 11
n_swaps 15, 16, 17, 18

T

temp 14, 16

VARIABLES page 3

Figur 9.6: «Lesbar programmering» — utskrift side 3

Meta symbols

⟨*bubble sort* #1⟩ ..... page 1 *
⟨*initialize* #6⟩ ..... page 2
⟨*local variables* #4⟩ ..... page 1
⟨*not sorted* #7⟩ ..... page 2
⟨*perform bubbling* #3⟩ ..... page 1
⟨*swap a[i] and a[i+1]* #5⟩ ..... page 2
⟨*use bubble sort* #2⟩ ..... page 1
(Symbols marked with * are not used.)

Figur 9.7: «Lesbar programmering» — utskrift side 4

Kapittel 10

Programredigering

Det finnes ulike verktøy for programmering. Vi skal her presentere to hovedgrupper, så får det bli opp til den enkelte å velge hva han eller hun vil bruke.

10.1 Spesialverktøy

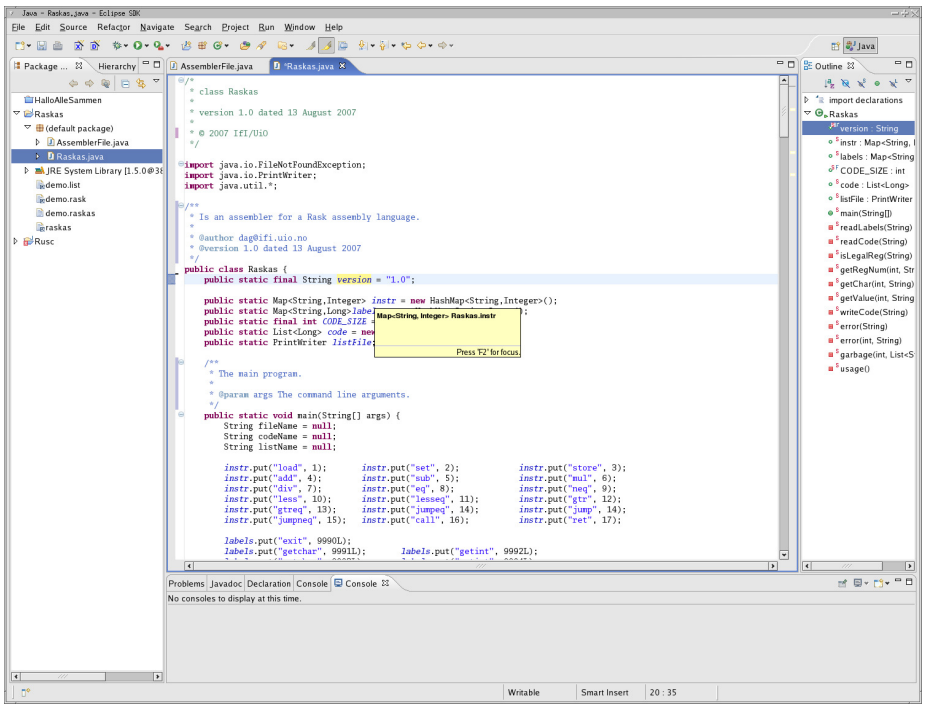
Et spesialverktøy er, som navnet sier, spesiallaget for ett spesielt språk. Det er typisk meget grafisk orientert; et eksempel til Java-programmering er Eclipse som er vist i figur 10.1 på neste side.

Det er mange og store fordeler med å bruke et slikt spesialverktøy som Eclipse eller NetBeans for Java:

- Mange brukere foretrekker «pek og klikk»-måten å jobbe på.
- Programmet har innebygget kunnskaper om Java og vil kunne vise feilmeldinger øyeblikkelig. (Man trenger ikke kompilere for å få se feilmeldingene.)
- Det går raskt å skrive kode fordi mye settes inn automatisk eller ved hjelp av menyer.
- Veldig mye informasjon om programmet gjøres lett tilgjengelig for brukeren. I figur 10.1 på neste side kan vi for eksempel se
  - Musen peker på variabelen `instr` og da kommer det frem et gult vindu med opplysninger om den, for eksempel hvilken type den har.
  - Tidligere har brukeren klikket på variabelen `version` og da ble alle forekomster av den variabelen markert med gult.
- Hvis det oppstår feil under en testkjøring, får brukeren øyeblikkelig se hvor i programmet feilen oppsto.

10.2 Generelle verktøy

Andre verktøy er generelle verktøy i den forstand at samme program brukes til mange ulike programmeringsspråk. De kan allikevel ha innebygget



Figur 10.1: Eclipse i arbeid

litt kunnskap om språket de skal redigere; et typisk eksempel er Emacs i figur 10.2 på neste side som kan fargekode nøkkelord i Java.

Det finnes situasjoner der det kan være ganske så fornuftig å velge et generelt redigeringsverktøy som for eksempel Emacs:

- Det finnes ikke spesialverktøy for alle programmeringsspråk – når man jobber med et litt ukjent språk, må man ta til takke med hva man kan få.
- Spesialverktøy krever oftest en grafiske omgivelse; om man ikke har det (for eksempel fordi man jobber over nettet via et kommandovindu), vil et generelt verktøy være redningen.
- Det kan være ganske mye jobb å lære et nytt spesialverktøy.
- I mange generelle verktøy jobber man raskere fordi det meste kan gjøres med tastaturet i stedet for med musen.
- Noen nyttige operasjoner finnes sjelden i spesialverktøyene:
  - Bytt om to tegn.
  - Bytt om to linjer.
  - Finn alle variabler som begynner med `runThis...` og omnavn dem til `runCurrent...`.

Figur 10.2: Emacs i arbeid