Undantagshantering och interna avbrott

Ur innehållet:

- Faults
- Software traps
- Undantagsprioriteter
- Avbrott från interna systemenheter, (”Systick”)

Målsättningar:

- Förklara hur undantagshantering går till
- Implementera en icke-blockerande fördröjning med SysTick

Undantagshantering

"Undantagshantering" är det sammanfattande begreppet för när normal sekventiell exekvering inte kan, eller ska, fortsätta.

Detta är föranlett av någon "exceptionell" händelse i systemet.

Ett inledande exempel på undantagshantering:

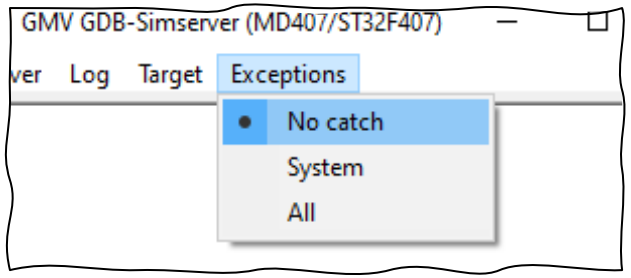
- Vi vet att ARM-processorns load/store- instruktioner optimerats genom att inte kunna referera word (4 bytes) på en udda address.
- Men vi kan enkelt skriva ett program som gör det, vad händer då?

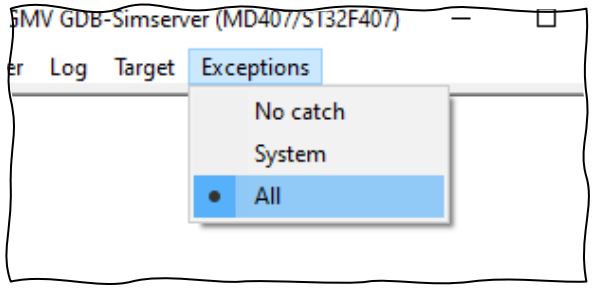
```
@ exception_unhandled.asm

start:
        LDR     R0,=0x20001001
        LDR     R0,[R0]
        NOP
```

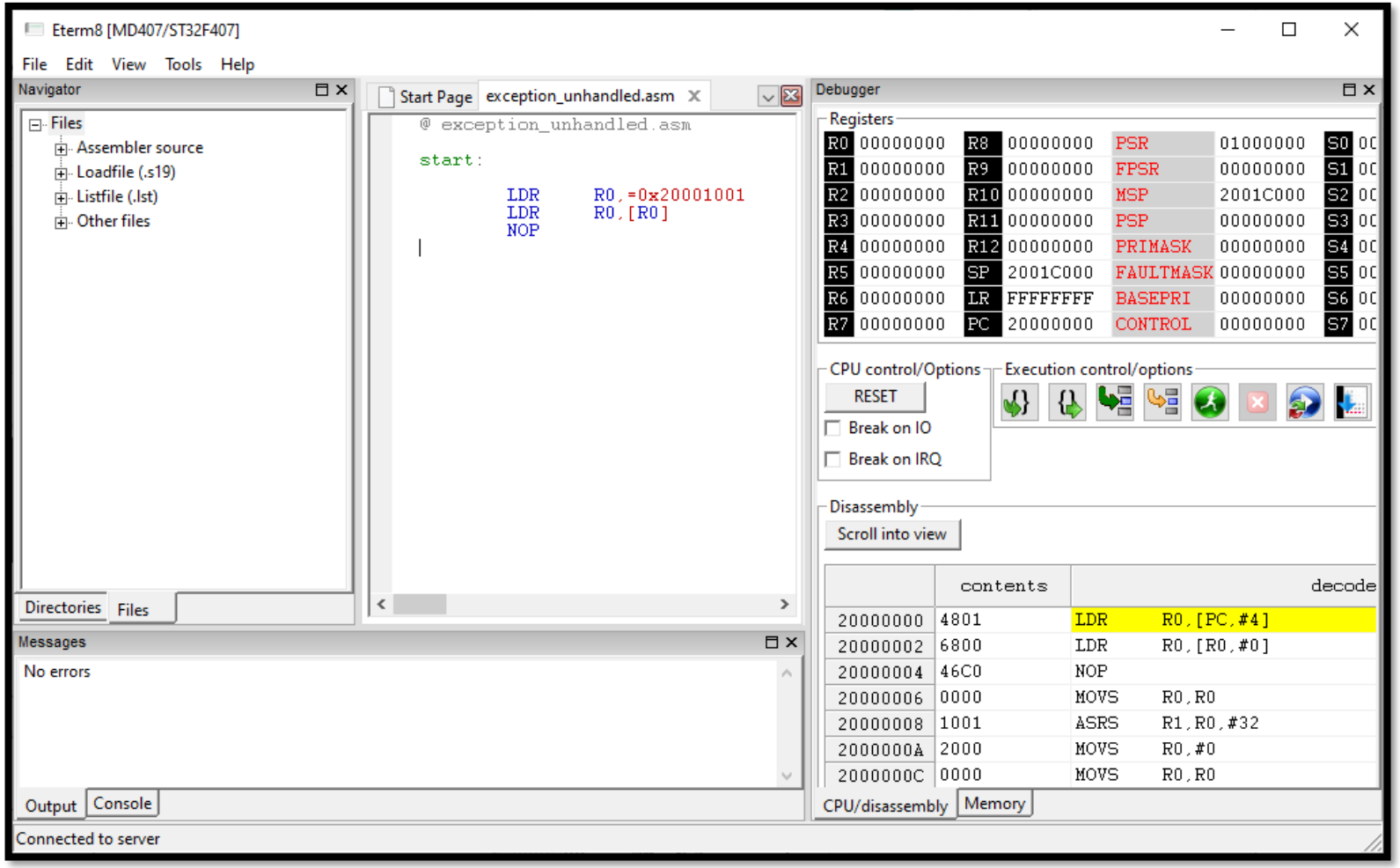
```
void main(void)
{
  int *ip, i;
  ip = (int *) 0x20001001;
  i = *ip;
}
```

Vi demonstrerar med simulator

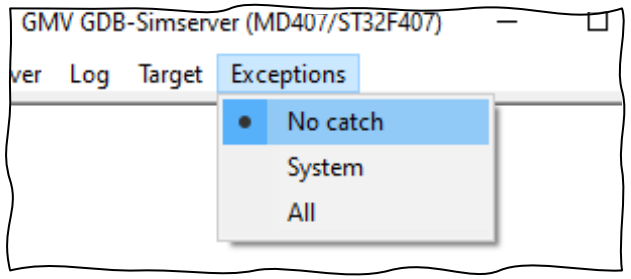
```
@
start:
  LDR   R0,=0x20001001
  LDR   R0,[R0]
  NOP
```

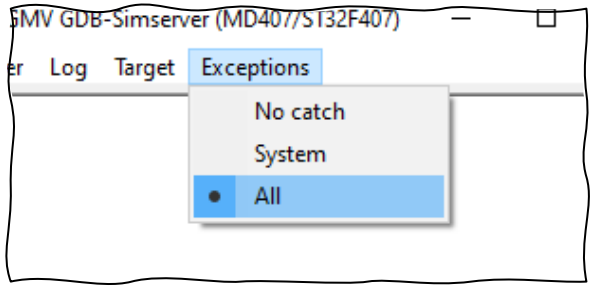


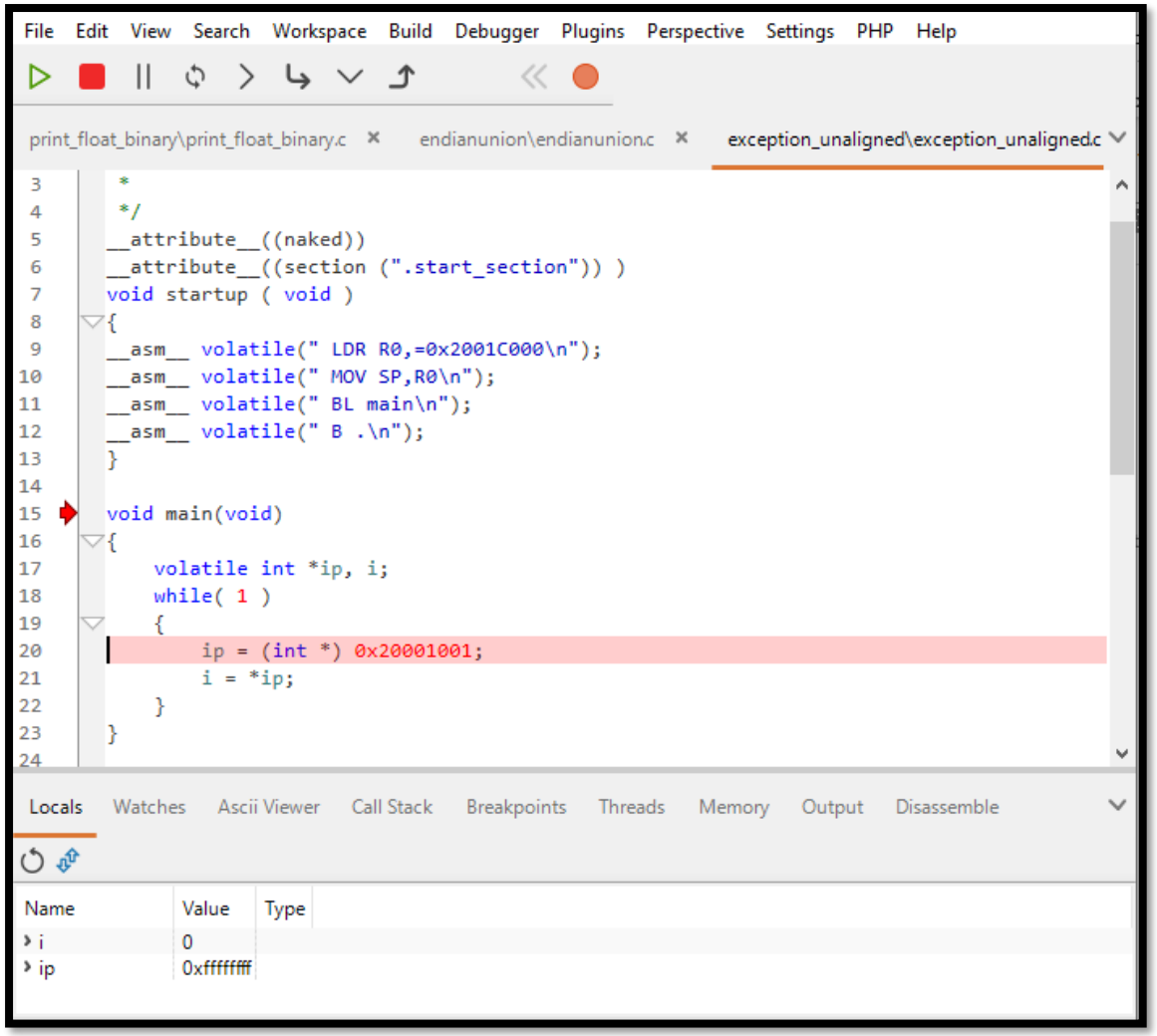




```
void main(void)
{
  int *ip, i;
  ip = (int *) 0x20001001;
  i = *ip;
}
```



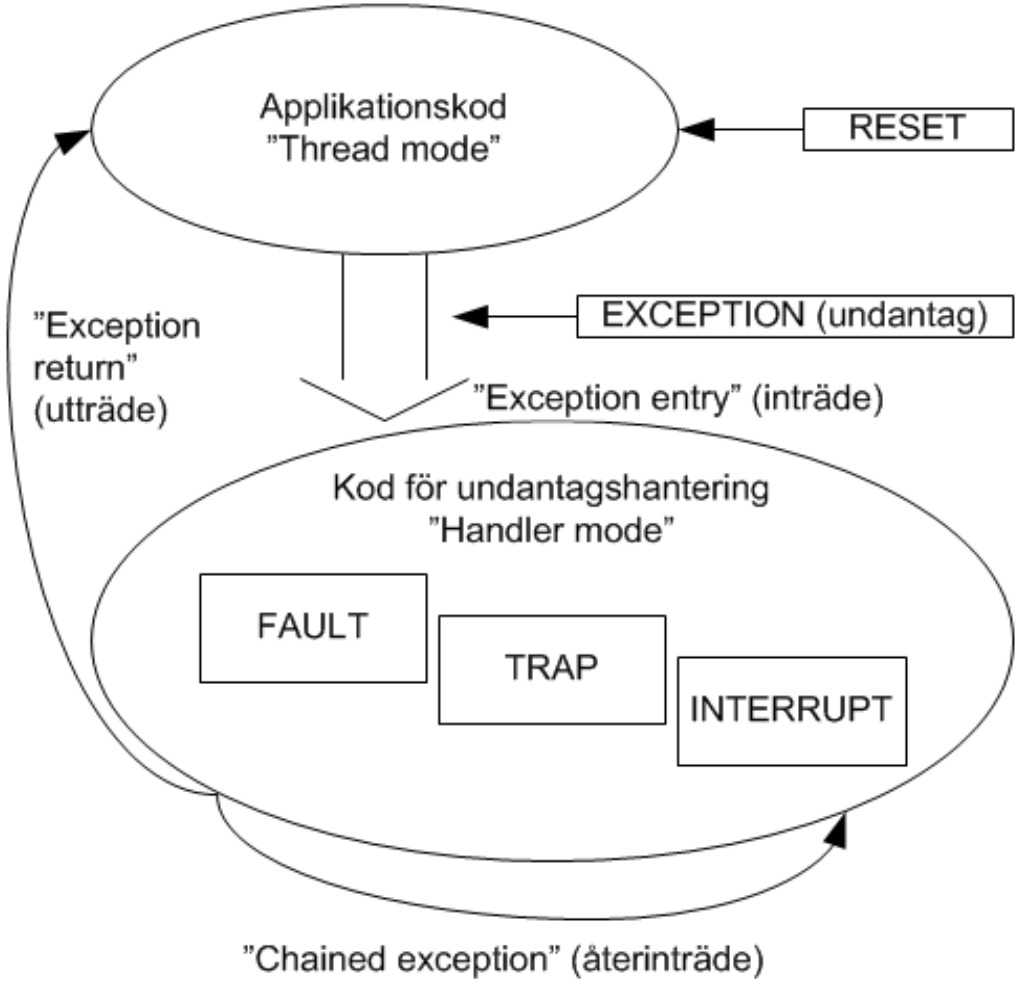




Undantagshantering - "exception"

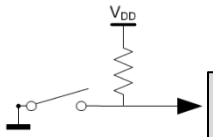
Med “undantag” menar vi olika typer av händelser:

- RESET (*återstart*):
  - *power on* (kallstart)
  - *warm reset* (varmstart)
- FAULT:
  - Exekveringsfel – kan inte fortsätta
- TRAP:
  - Programmerat avbrott, initierat av maskininstruktion
- INTERRUPT:
  - Hårdvarusignalerat avbrott

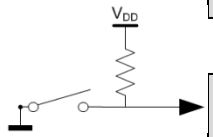


Undantagstyper

De olika undantagstyperna har en naturlig, fallande prioritet



RESET:
- power on (kallstart)
- warm reset (varmstart)



NMI:
Non Maskable Interrupt

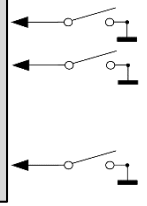
FAULT:
- Hard fault
  generellt fel
- Memory management fault
  fel användning av minne
- Bus fault
  exvis obefintligt minne
- Usage fault
  exvis ”unaligned”

TRAP:
- SVC- instruktion
- BPKT-instruktion
- ...

INTERRUPT:

INTERNA:
- SysTick
- Watchdog
- Periferikretsar
  .....

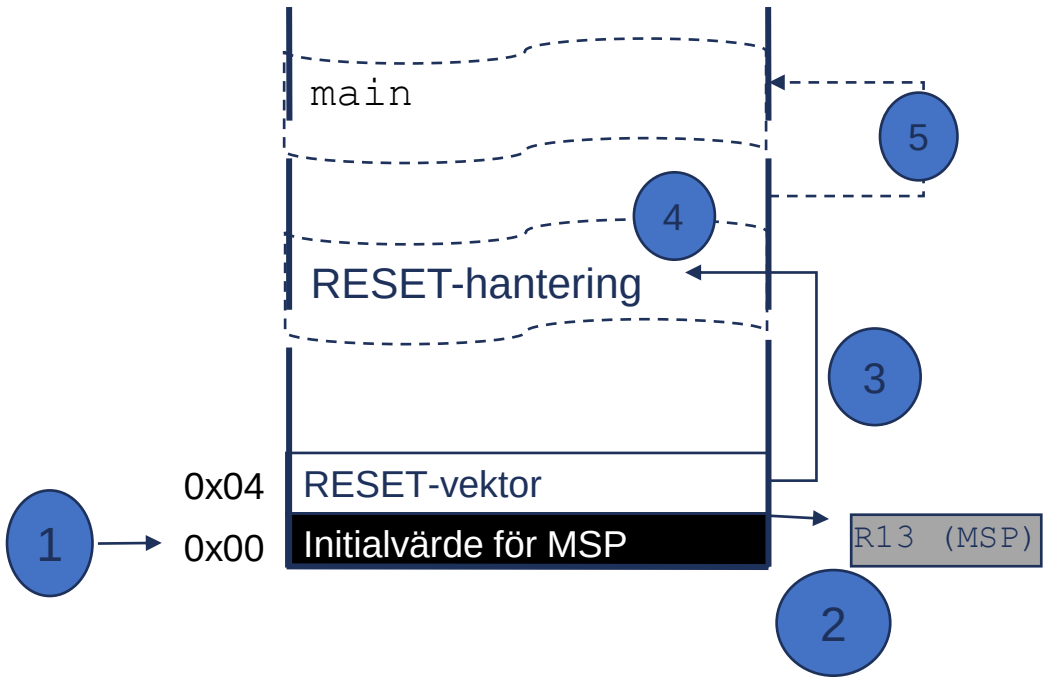
EXTERNA:
- IO-pinnar kan konfigureras som avbrottsingångar
- EXTI (External Interrupt) modul

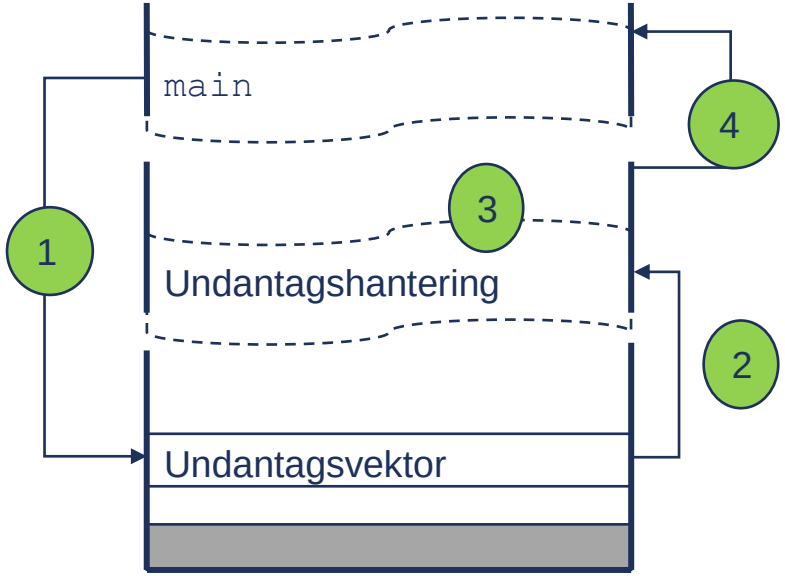


Högsta prioritet

Lägre prioritet

Exekvering vid undantag





1. Återstart (Reset aktiverad)
2. Ladda MSP (Main Stack Pointer) från adress 0x00
3. Ladda RESET-vector från adress 0x04
4. RESET-hantering exekveras i “Thread mode”
5. Systemets huvudprogram startas

1. Något undantag inträffar
   - Pågående instruktion utförs klart
   - Vektortabellen adresseras
2. Den specifika undantagsvektorn hämtas
3. Undantagshantering i “Handler Mode”
4. Återgång efter undantagshantering "Thread Mode"

Vektortabellen

Anger position för de olika undantagsvektorerna.

De 16 första positionerna är samma för alla Cortex-M4.

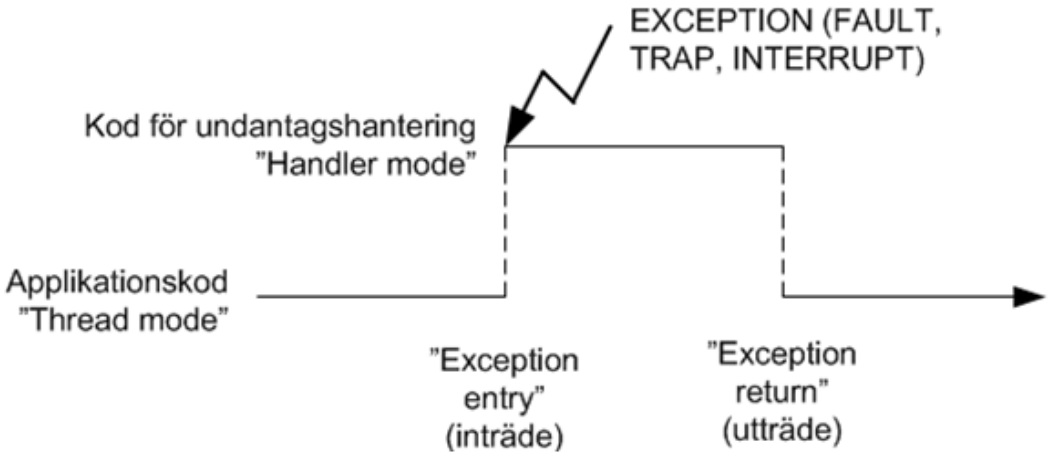
Resten av tabellen är specifik för den aktuella microcontrollern.

IRQ num	priority	name	description	vector offset
-			Reserved for initial stack pointer	0x0000 0000
-	fixed, -3	Reset	Reset	0x0000 0004
-14	fixed, -2	NMI	Non maskable interrupt. The RCC Clock Security System (CSS) is linked to the NMI vector.	0x0000 0008
-13	fixed, -1	HardFault	All class of fault	0x0000 000C
-12	settable	MemManage	Memory management	0x0000 0010
-11	settable	BusFault	Pre-fetch fault, memory access fault	0x0000 0014
-10	settable	UsageFault	Undefined instruction or illegal state	0x0000 0018
	.	.	Reserved	0x0000 001C - 0x0000 002B
-5	settable	SVCall	System service call via SWI instruction	0x0000 002C
-4	settable	Debug Monitor	Debug Monitor	0x0000 0030
	-	-	Reserved	0x0000 0034
-2	settable	PendSV	Pendable request for system service	0x0000 0038
-1	settable	SysTick	System tick timer	0x0000 003C
0	settable	WWDG	Window Watchdog interrupt	0x0000 0040
1	settable	PVD	PVD through EXTI line detection interrupt	0x0000 0044
2	settable	TAMP_STAMP	Tamper and TimeStamp interrupts through the EXTI line	0x0000 0048
3	settable	RTC_WKUP	RTC Wakeup interrupt through the EXTI line	0x0000 004C
4	settable	FLASH	Flash global interrupt	0x0000 0050
5	settable	RCC	RCC global interrupt	0x0000 0054
6	settable	EXTI0	EXTI Line0 interrupt	0x0000 0058
7	settable	EXTI1	EXTI Line1 interrupt	0x0000 005C
8	settable	EXTI2	EXTI Line2 interrupt	0x0000 0060
9	settable	EXTI3	EXTI Line3 interrupt	0x0000 0064
10	settable	EXTI4	EXTI Line4 interrupt	0x0000 0068
11	settable	DMA1_Stream0	DMA1 Stream0 global interrupt	0x0000 006C
79	settable	CRYP	CRYP crypto global interrupt	0x0000 017C
80	settable	HASH_RNG	Hash and Rng global interrupt	0x0000 0180
81	settable	FPU	FPU global interrupt	0x0000 0184

Undantagshantering - detaljerna

"Inträdet" hanteras automatiskt av processor.

"Utträdet" initieras och handhas av programvaran (undantagsrutinen)



Inträde:

Spara aktuell processorstatus ("save context"), dvs.

- Spara registerinnehåll på stacken
- Sätt nytt speciellt innehåll i LR (EXC_RETURN) baserat på processorstatus

Ändra processorstatus för undantagshantering

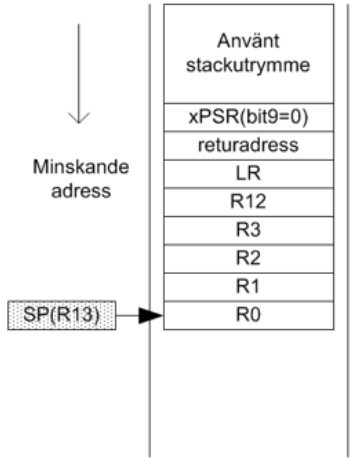
- Sätt undantagsnummer i PSR
- Placera undantagsvektor i PC

Utträde:

Återställ avbruten processorstatus) ("restore context")

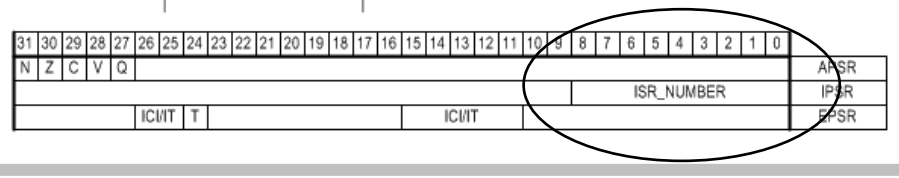
Återställ PC. Det speciella EXC_RETURN värdet som då hamnar i PC avkodas.

Registerinnehåll återställls då från stacken varvid PC får rätt återhoppsadress.



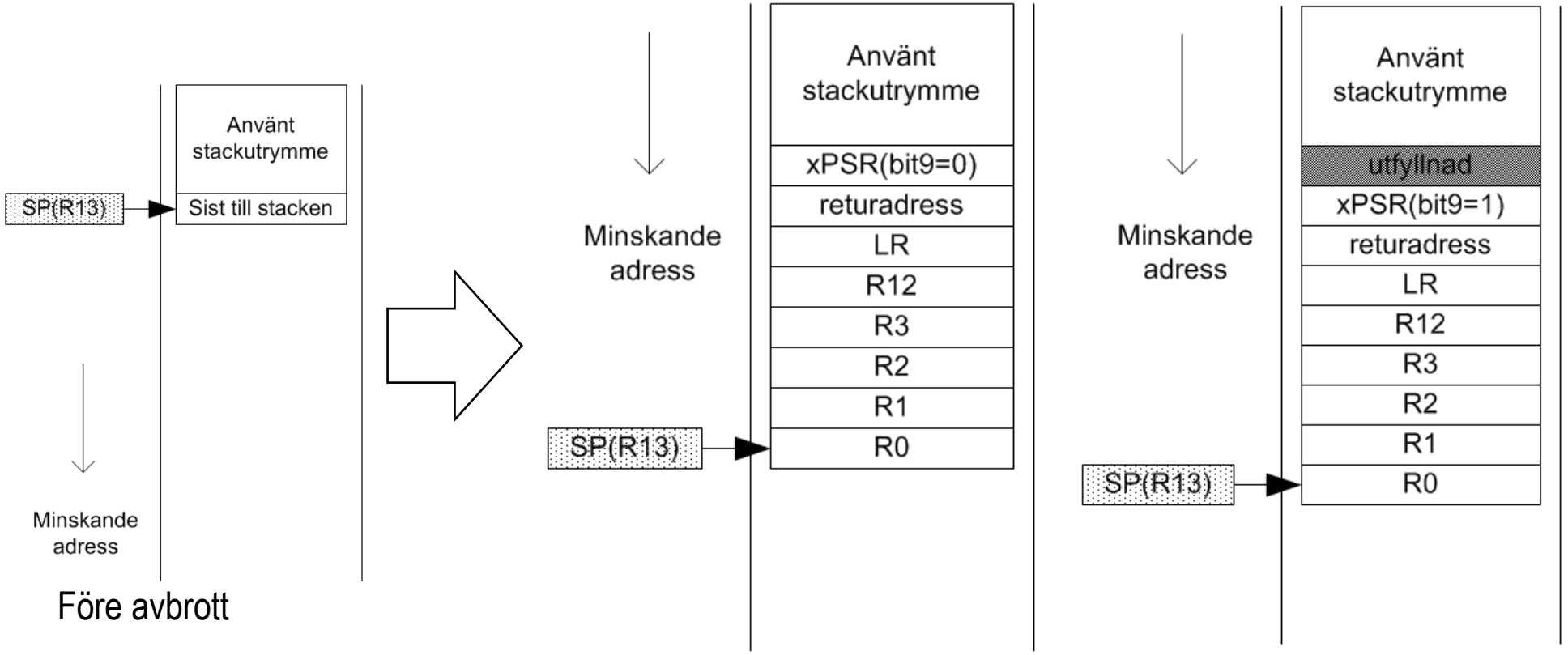
	Flyttal aktiverat	Flyttal ej aktiverat
Åter till *handler mode* – använd *main stack*	0xFFFFFFE1	0xFFFFFFF1
Åter till *thread mode* – använd *main stack*	0xFFFFFFE9	0xFFFFFFF9
Åter till *thread mode* – använd *process stack*	0xFFFFFFED	0xFFFFFFFD

EXCEPTION RETURN WORD



Stacken i avbrottsfunktionen

Ej aktiverad flyttalsenhet



Processorn fyller automatiskt ut med 4 bytes om detta skulle krävas för att SP ska innehålla adress på adress jämnt delbar med 8. Detta indikeras med att bit9 i PSR sätts till 1.

Återgång från avbrott

Värdet som laddas i PC anger detaljerna för återställning efter avbrott

EXEC RETURN WORD

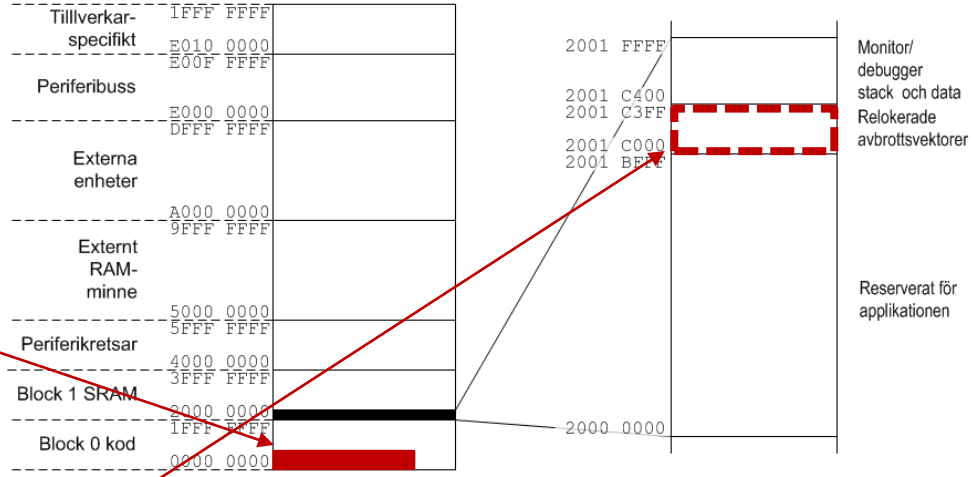
	Flyttal aktiverat	Flyttal ej aktiverat
Åter till *handler mode* – använd *main stack*	0xFFFFFFE1	0xFFFFFFF1
Åter till *thread mode* – använd *main stack*	0xFFFFFFE9	0xFFFFFFF9
Åter till *thread mode* – använd *process stack*	0xFFFFFFED	0xFFFFFFFD

- Kan återvända från avbrott med följande instruktioner då PC laddas med "det magiska värdet" 0xFFFF_FFFX
  - LDR PC, …..
  - LDM/POP då PC ingår i registerlistan
  - BX LR mest vanligt, typiskt retur från en subrutin
- Om inga ytterligare avbrott avvaktar:
  - återställs stack och tillstånd baserat på EXC_RETURN
- Om avbrott avvaktar:
  - återställning av stack/tillstånd fördröjs ("tail-chaining")
  - avvaktande avbrott betjänas

(EXC_RETURN) avgör hur stack och processortillstånd återställs efter avbrott

Relokering av vektortabellen

Vektortabellen startar på address 0 i minnet (Alltid *Read Only*-minne) ....



... men kan relokeras så att vektorerna hamnar i RWM, exempelvis:

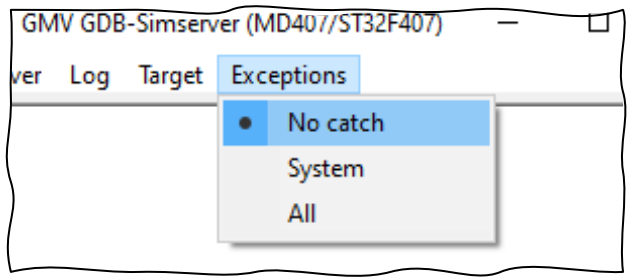
```
#define SCB_VTOR  ((volatile unsigned long *)0xE000ED08)
*SCB_VTOR = 0x2001C000;
```

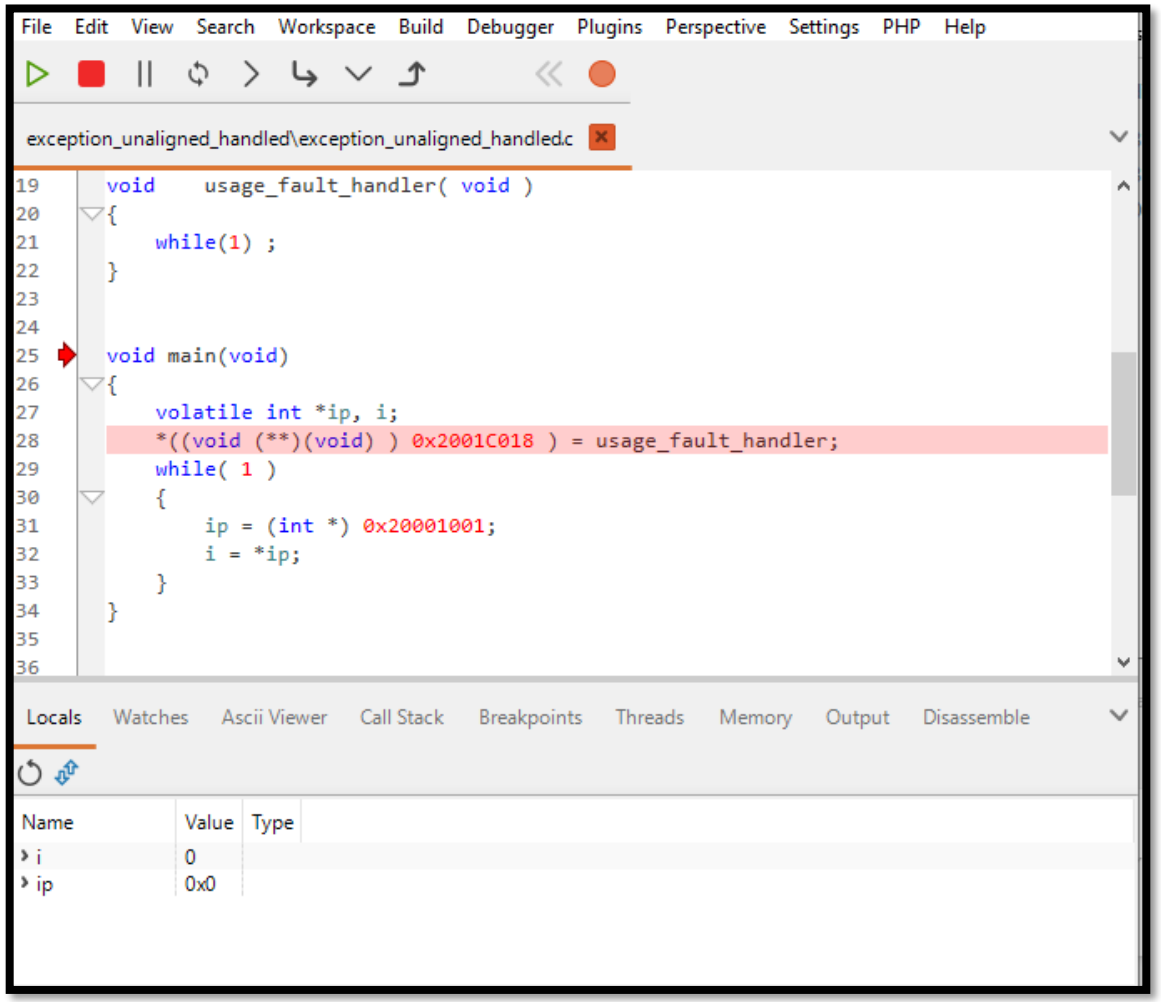
Exempel:
Initiera avbrottsvektor "usage fault"

1	settable	BusFault	Pre-fetch fault, memory access fault	0x0000 0014
2	settable	UsageFault	Undefined instruction or illegal state	0x0000 0018
.	.	.	Reserved	0x0000 001C - 0x0000 002B
3	settable	SVCall	System service call via SWI	0x0000 002C

```
void   usage_fault_handler( void );

...
*((void (**)(void) ) 0x2001C018 ) = usage_fault_handler;
```

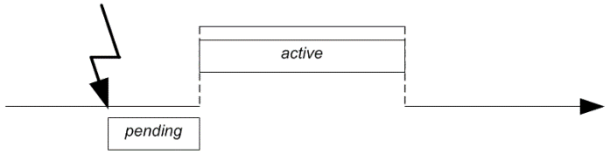
```c
void usage_fault_handler( void )
{
  while(1) ;
}

void main(void)
{
  volatile int *ip, i;
  *((void (**)(void) ) 0x2001C018 ) = usage_fault_handler;
  while( 1 )
  {
    ip = (int *) 0x20001001;
    i = *ip;
  }
}
```



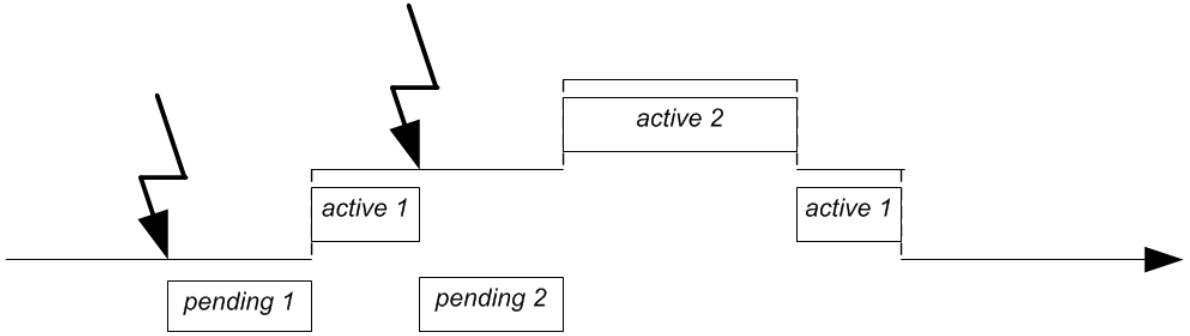


Avbrottsprioritet

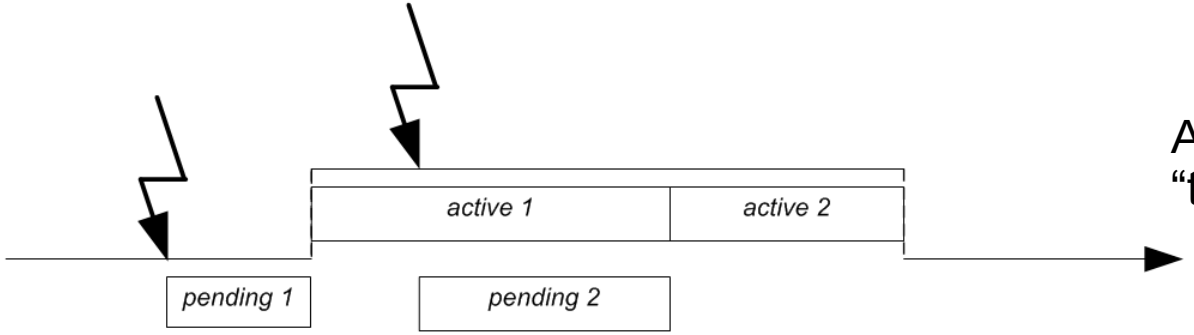
Flera samtidiga avbrott:
pending, *active* och *prioriteter*



Ett avbrott uppträder och betjänas



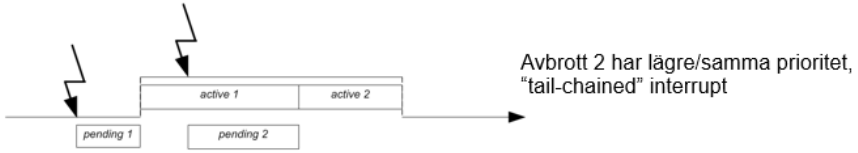
Avbrott 2 har högre prioritet, ytterligare “context switch”



Avbrott 2 har lägre/samma prioritet, “tail-chained” interrupt

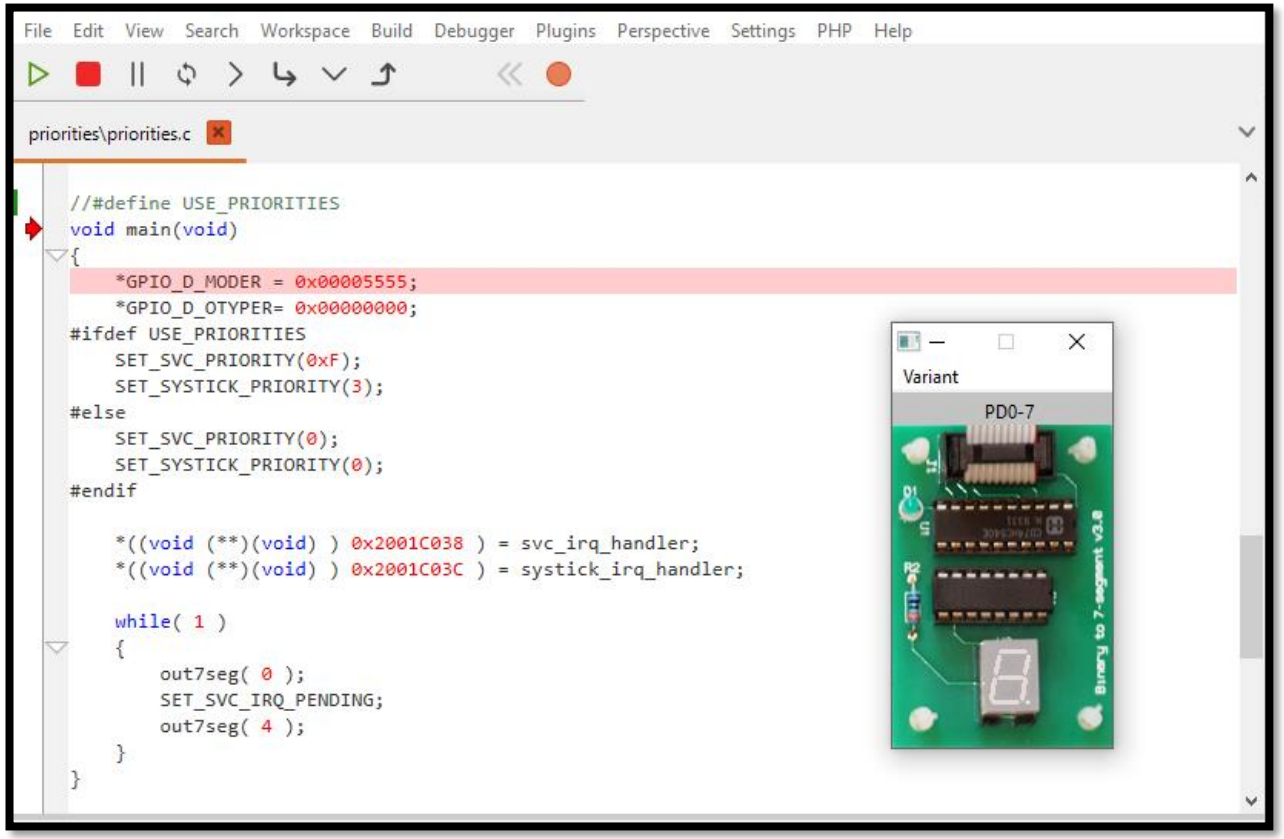
Vi demonstrerar med simulator

Avbrottsprioritet



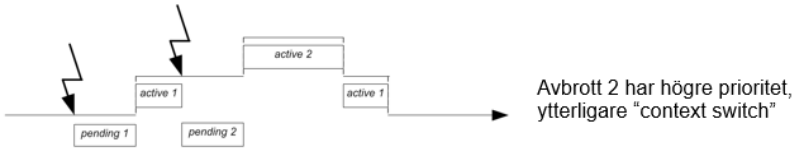
Avbrott 2 har lägre/samma prioritet, "tail-chained" interrupt

```
void svc_irq_handler( void )
{
    out7seg( 1 );
    SET_SYSTICK_IRQ_PENDING;
    out7seg( 3 );
}
void systick_irq_handler( void )
{
          out7seg( 2 );
}
void main(void)
{
    .. .
    SET_SVC_PRIORITY(0);
    SET_SYSTICK_PRIORITY(0);
    while( 1 )
    {
        out7seg( 0 );
        SET_SVC_IRQ_PENDING;
        out7seg( 4 );
    }
}
```



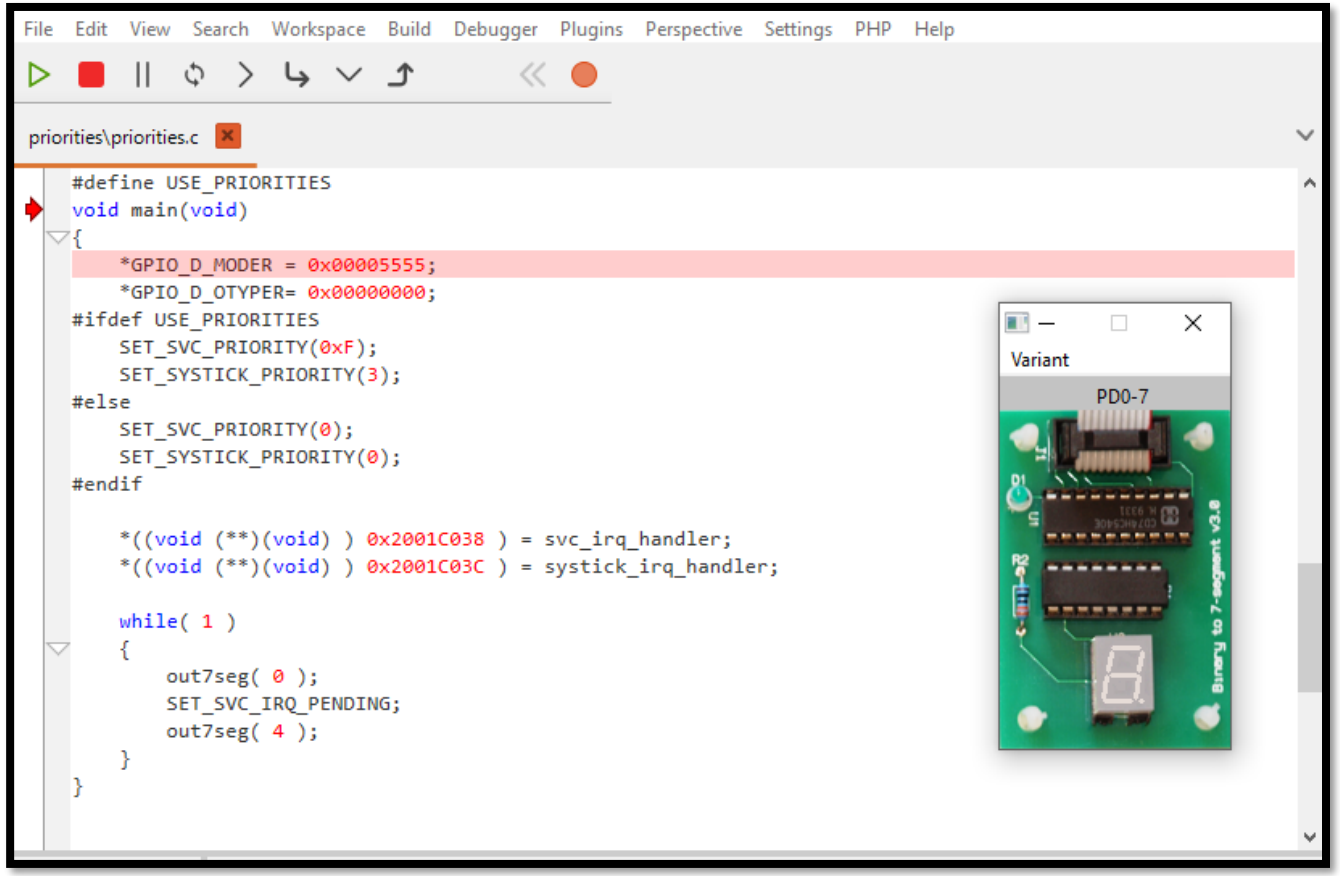
Här ska sifferföljden: 0,1,3,2,4 skrivas till 7-segmentsdisplayen

Avbrottsprioritet



Avbrott 2 har högre prioritet, ytterligare "context switch"

```
void svc_irq_handler( void )
{
    out7seg( 1 );
    SET_SYSTICK_IRQ_PENDING;
    out7seg( 3 );
}
void systick_irq_handler( void )
{
        out7seg( 2 );
}
void main(void)
{
    .. .
    SET_SVC_PRIORITY(0xF);
    SET_SYSTICK_PRIORITY(3);
    while( 1 )
    {
        out7seg( 0 );
        SET_SVC_IRQ_PENDING;
        out7seg( 4 );
    }
}
```



Här ska sifferföljden: 0,1,2,3,4
skrivas till 7-segmentsdisplayen

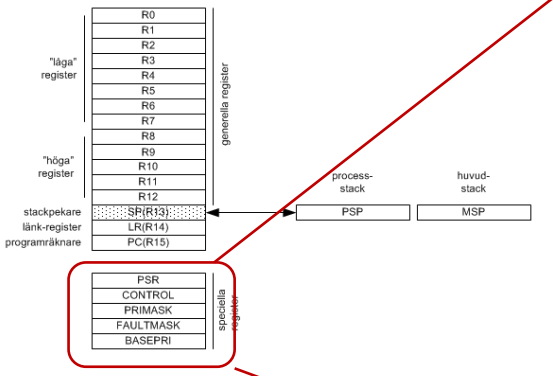
Speciella register

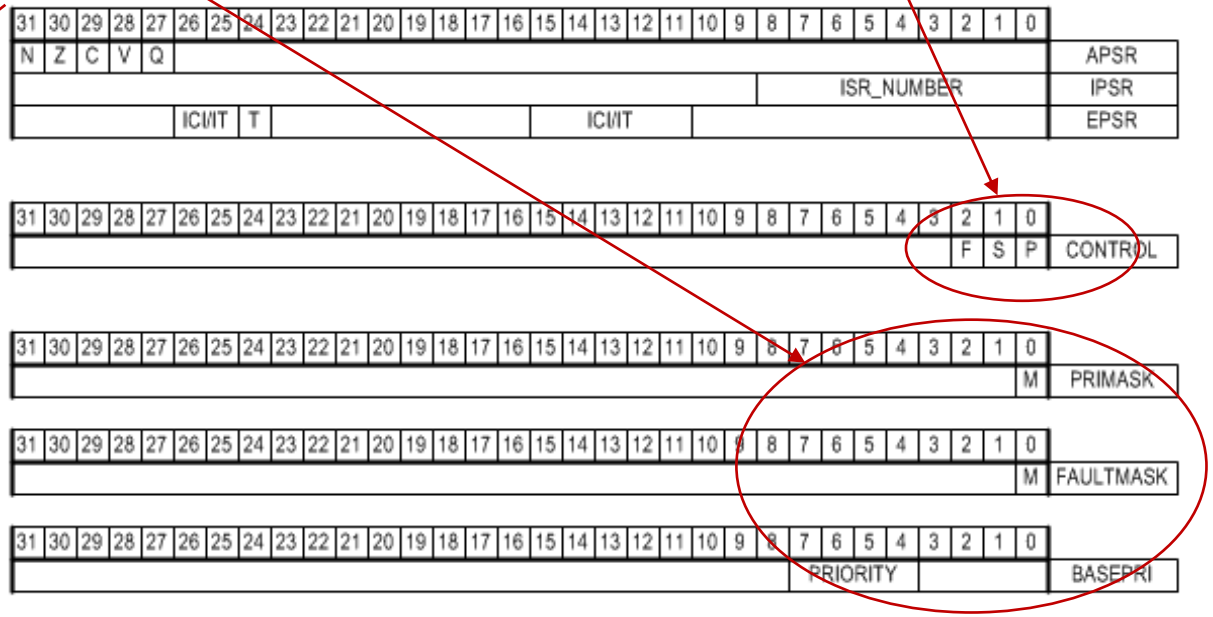
används för att ange:

- Om flyttalsprocessor ska aktiveras
- Vilken stack som används
- Vilket exekveringstillstånd som används
- Om undantag/avbrott ska betjänas

Exempel:

```
void __setCONTROL( unsigned int val)
{
  __asm__ volatile (" MSR   CONTROL,R0\n");
}
```

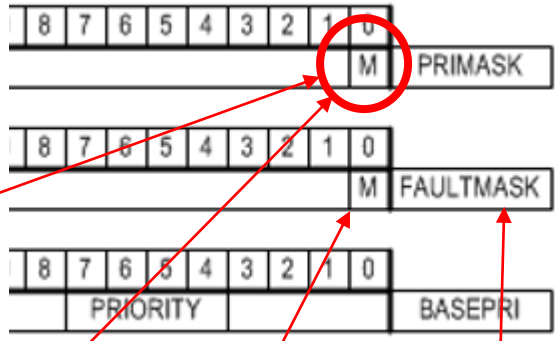




Maskera undantag

Man kan undvika problematiken med avbrottsprioriteter:

I undantagsrutinen kan man tillfälligt höja den egna prioriteten till högsta nivå genom att sätta prioritetsmasken i PRIMASK till 1.




```
void disable_interrupt( void )
{
  __asm__ volatile(" CPSID I\n");
}
```

```
void enable_interrupt( void )
{
  __asm__ volatile(" CPSIE I\n");
}
```

Undantagsrutinen måste då också återställa prioritetsmasken till 0 innan återgång.
I annat fall kommer alla framtida avbrott att blockeras.

```
void irq_handler( void )
{
    disable_interrupt();
    ....
    enable_interrupt();
}
```

```
void disable_fault( void )
{
  __asm__ volatile (" CPSID F\n");
}
```

```
void enable_fault( void )
{
  __asm__ volatile (" CPSIE F\n");
}
```

Processorns olika tillstånd

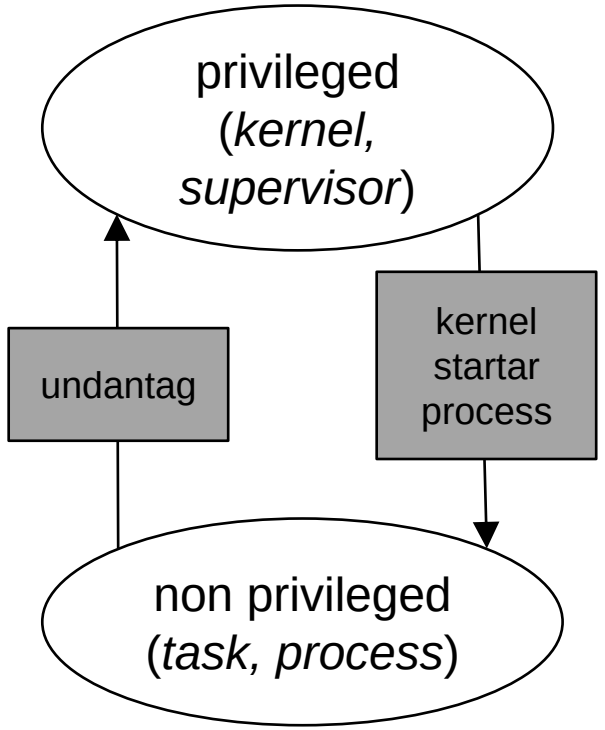
- ***Handler*** *(undantagshantering)/****Thread mode*** *(normal exekvering)*, sköts automatiskt av processorn.

För att underlätta konstruktion av operativsystem finns också:

- ***Privileged/Non-privileged state***, kan programmeras. I *Non-priveleged* state fungerar *priviligierade* instruktioner som NOP.
- ***Main stack/Process stack*** – kan programmeras, processorn använder olika fysiska register (MSP eller PSP) som stackpekare.

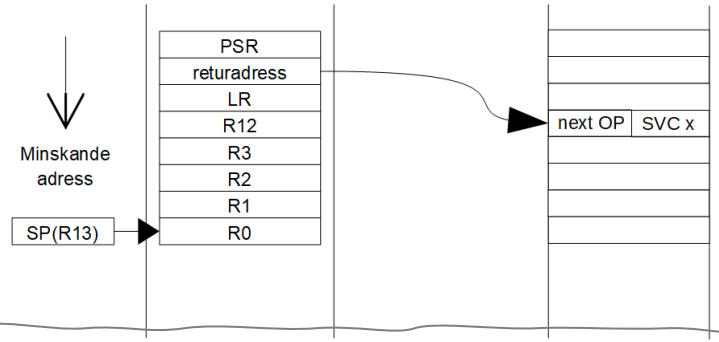
Operativsystemets programvara (*kernel*) exekveras med alla resurser tillgängliga (priviligierat).

Applikationsprogrammet exekveras i en begänsad miljö (icke priviligierat), övervakad av *kernel*.



SVCall (SuperVisor Call)

			Reserved	0x0000 001C - !
-5	settable	SVCall	System service call via SWI instruction	0x0000 002C
-4	settable	Debug Monitor	Debug Monitor	0x0000 0030



En software trap instruktion för att utföra inbyggda funktioner.

- Ger en kontrollerad växling mellan *non-privileged* och *privileged* mode.
- Kompakt sätt att utföra funktion

```
@ SVC, SuperVisorCall
operationskoden är 0xDFxx, där xx utgör konstanten

__attribute__((naked))
void graphic_initalize(void)
{
  __asm volatile (" .HWORD 0xDFF0\n");
  __asm volatile (" BX LR\n");
}
```

```
static  __attribute__((naked))
void svcHandler( void )
{
__asm volatile(" MOV R0,SP\n");
__asm volatile(" B   os_call\n");
__asm volatile(" .ALIGN  2\n");
}

void _graphic_initalize( void  );
void _graphic_clear_screen( int x, int y);
void _graphic_pixel_set( int x, int y);
void _graphic_pixel_clear( int x, int y);


void os_call( unsigned int * call_args)
{
  unsigned int oscall = ((char *) call_args[6]) [-2];
  switch( oscall )
  {
    case 0xF0: _graphic_initalize(); break;
    case 0xF1: _graphic_clear_screen(); break;
    case 0xF2: _graphic_pixel_set(call_args[0],call_args[1] )break;
    case 0xF3: _graphic_pixel_clear(call_args[0],call_args[1] )break;
  }
}
```

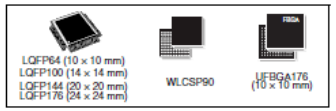
Interna avbrott

life.augmented

STM32F405xx
STM32F407xx

ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU, 210DMIPS, up to 1MB Flash/192+4KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 15 comm. interfaces & camera

Datasheet - production data

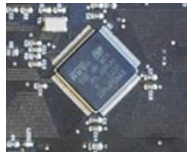


Features

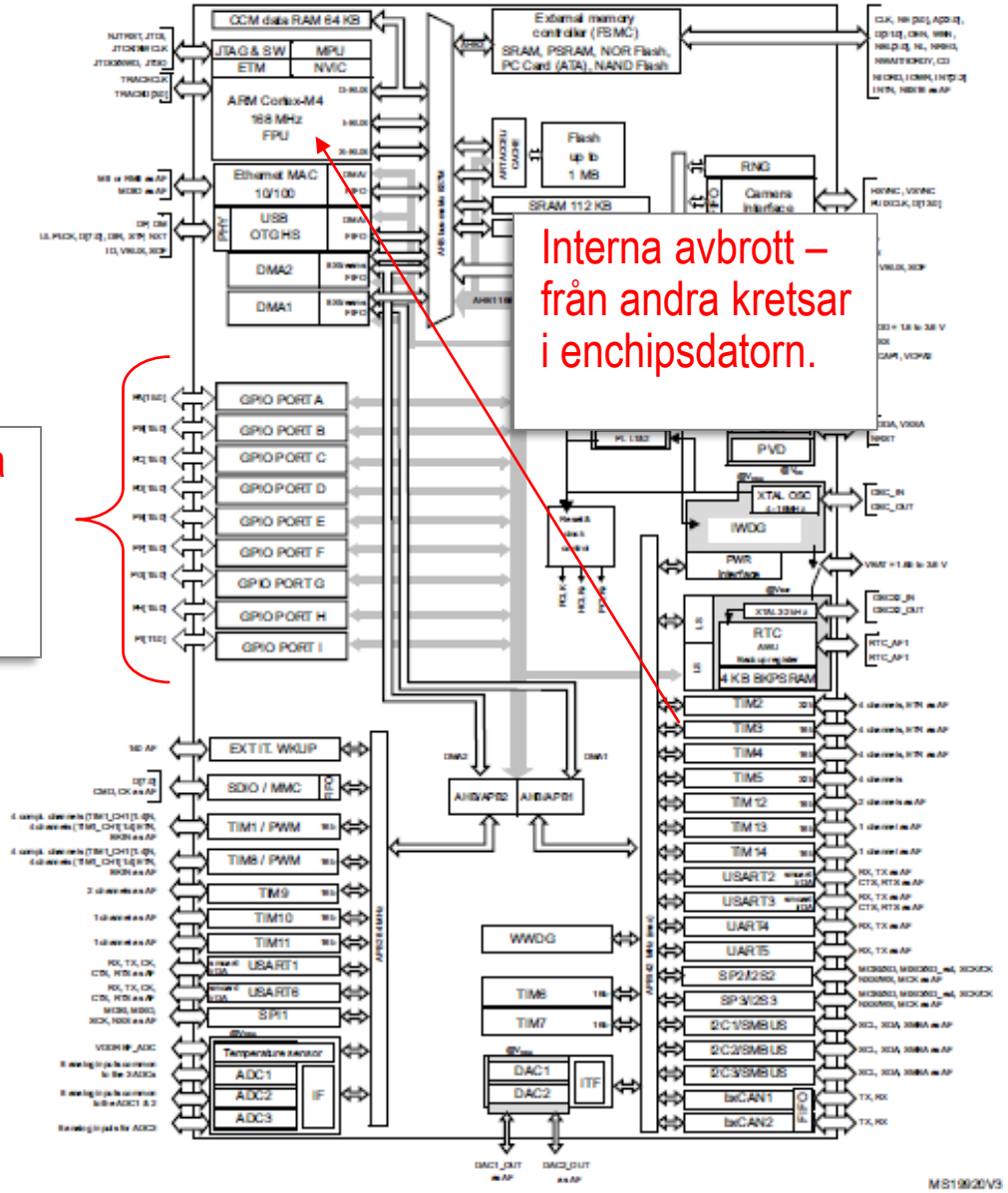
- Core: ARM 32-bit Cortex™-M4 CPU with FPU, Adaptive real-time accelerator (ART Accelerator™) allowing 0-wait state execution from Flash memory, frequency up to 168 MHz, memory protection unit, 210 DMIPS/ 1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1), and DSP instructions
- Memories
  - Up to 1 Mbyte of Flash memory
  - Up to 192+4 Kbytes of SRAM including 64-Kbyte of CCM (core coupled memory) data RAM
  - Flexible static memory controller supporting Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR and NAND memories
- LCD parallel interface, 8080/6800 modes
- Clock, reset and supply management
  - 1.8 V to 3.6 V application supply and I/Os
  - POR, PDR, PVD and BOR
  - 4-to-26 MHz crystal oscillator
  - Internal 16 MHz factory-trimmed RC (1% accuracy)
  - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
  - Internal 32 kHz RC with calibration
- Low power
  - Sleep, Stop and Standby modes
  - V_{BAT} supply for RTC, 20×32 bit backup registers + optional 4 KB backup SRAM
- 3×12-bit, 2.4 MSPS A/D converters: up to 24 channels and 7.2 MSPS in triple interleaved mode
- 2×12-bit D/A converters
- General-purpose DMA: 16-stream DMA controller with FIFOs and burst support
- Up to 17 timers: up to twelve 16-bit and two 32-bit timers up to 168 MHz, each with up to 4 IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input
- Debug mode
  - Serial wire debug (SWD) & JTAG interfaces
  - Cortex-M4 Embedded Trace Macrocell™
- Up to 140 I/O ports with interrupt capability
  - Up to 136 fast I/Os up to 84 MHz
  - Up to 138 5 V-tolerant I/Os
- Up to 15 communication interfaces
  - Up to 3 × I^2C interfaces (SMBus/PMBus)
  - Up to 4 USARTs/2 UARTs (10.5 Mbit/s, ISO 7816 interface, LIN, IrDA, modem control)
  - Up to 3 SPIs (42 Mbits/s), 2 with muxed full-duplex I^2S to achieve audio class accuracy via internal audio PLL or external clock
  - 2 × CAN interfaces (2.0B Active)
  - SDIO interface
- Advanced connectivity
  - USB 2.0 full-speed device/host/OTG controller with on-chip PHY
  - USB 2.0 high-speed/full-speed device/host/OTG controller with dedicated DMA, on-chip full-speed PHY and ULPI
  - 10/100 Ethernet MAC with dedicated DMA: supports IEEE 1588v2 hardware, MII/RMII
- 8- to 14-bit parallel camera interface up to 54 Mbytes/s
- True random number generator
- CRC calculation unit
- 96-bit unique ID
- RTC: subsecond accuracy, hardware calendar

Table 1. Device summary

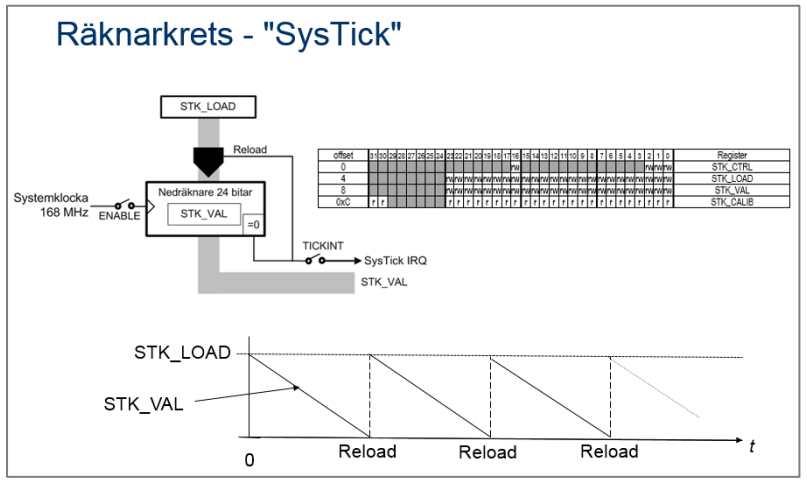
Reference	Part number
STM32F405xx	STM32F405RG, STM32F405VG, STM32F405ZG, STM32F405OG, STM32F405OE
STM32F407xx	STM32F407VG, STM32F407IG, STM32F407ZG, STM32F407VE, STM32F407ZE, STM32F407IE



Externa avbrott – via portpinnar från kretsar utanför enchipsdatorn.



”SysTick” med avbrott...



Algoritm:

STK_CTRL = 0	Återställ SysTick
STK_LOAD =	CountValue
STK_VAL = 0	Nollställ räknarregistret
STK_CTRL = 5	Starta om räknaren
Vänta till COUNTFLAG=1	
STK_CTRL = 0	Återställ SysTick

”Blockerande” – ty programmet kan inte göra något annat än vänta tills fördröjningen, dvs. COUNTFLAG blir 1, är klar....

STK_CTRL *Status och styrregister*

offset	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	Register
0																rw															rw	rw	rw	STK_CTRL

Bit 16: (COUNTFLAG):
Biten är 1 om räknaren räknat ned till 0. Biten nollställs då registret läses.

Bit 2: (CLKSOURCE) biten är 1 efter RESET:
0: Systemklocka/8
1: Systemklocka

Bit 1: (TICKINT): Aktivera avbrott
0: Inget avbrott genereras.
1: Då räknaren slagit om till 0 genererar SysTick avbrott.

Anm: Man kan programvarumässigt undersöka om räknaren räknat ned till 0 genom att kontrollera biten COUNTFLAG, det är alltså inte nödvändigt att använda avbrottsmekanismen.

Bit 0: (ENABLE) Aktivera räknare
Då ENABLE ettställs laddas värdet från STK_LOAD till STK_VAL och räknaren börjar räkna ned. Då räknaren nått 0, ettställs COUNTFLAG och proceduren upprepas.
0: Räknare deaktiverad
1: Räknare aktiverad

Algoritm:

STK_CTRL = 0	Återställ SysTick
STK_LOAD =	CountValue
STK_VAL = 0	Nollställ räknarregistret
STK_CTRL = 7	Starta om räknaren
Avbrott genereras då COUNTFLAG=1	

”Icke-blockerande” – ty programmet kan fortsätta med att exekvera, då fördröjningen är klar, dvs. COUNTFLAG är 1, genereras ett avbrott.

Icke-blockerande fördröjning med SysTick

Skapa en fördröjningsfunktion `delay(unsigned int u)` som skapar u mikrosekunders fördröjning.

Visa hur ett testprogram kan använda funktionen för att åstadkomma fördröjning i en bunden programslinga *utan att blockeras.*

Testprogrammet ska tända en diodramp under den tid fördröjningen varar.

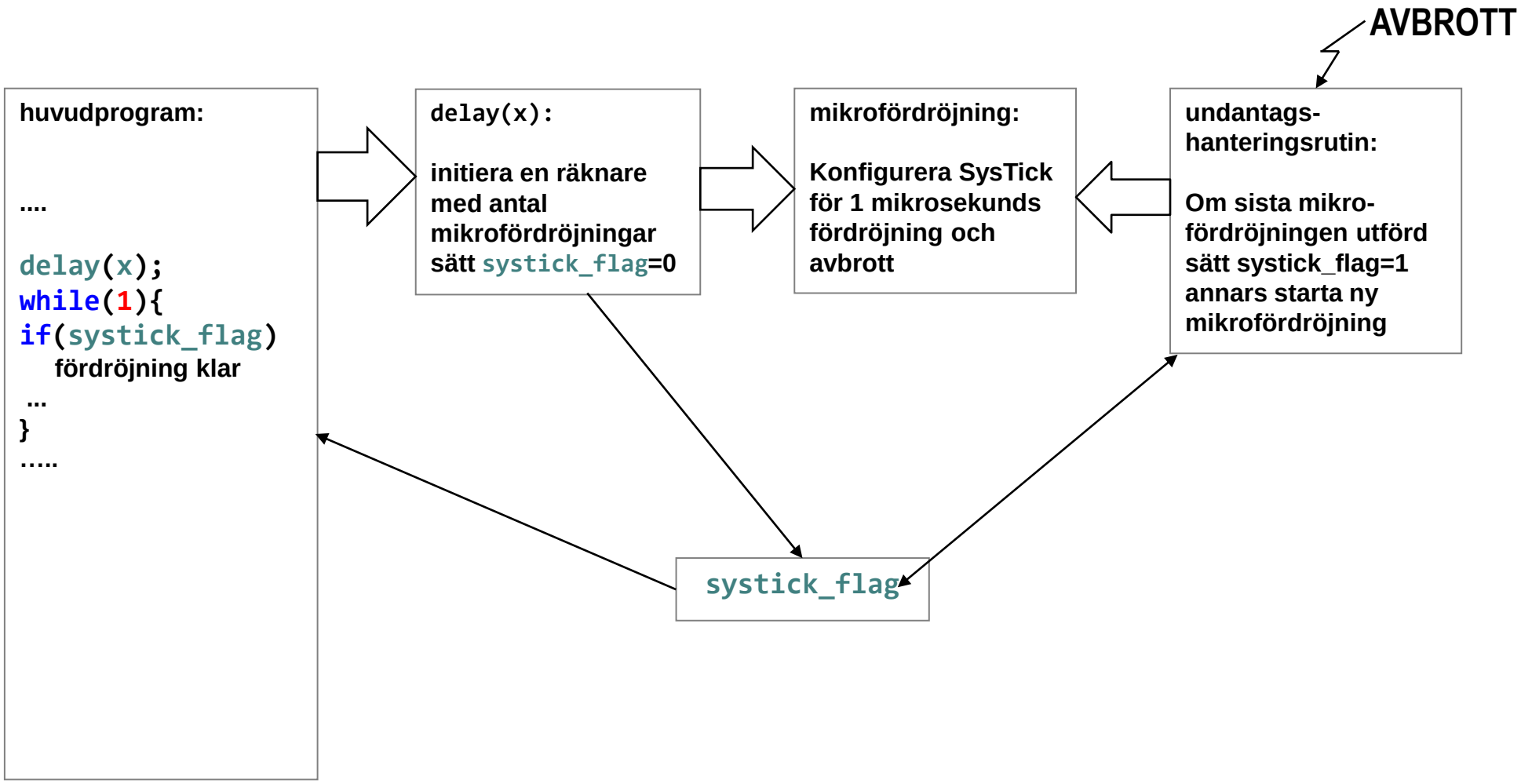
En annan diodramp ska visa en kontinuerligt uppräknad variabel

Testprogrammet:

```
#define DELAY_COUNT 1000
void main(void)
{
     init_app();
     *GPIO_ODR_LOW = 0;
     delay( DELAY_COUNT );
     *GPIO_ODR_LOW = 0xFF;
     while(1)
     {
          if( systick_flag )
               break;
          /* ”Parallell kod” ... */
          *GPIO_ODR_HIGH = c;
          c++;
     }
     *GPIO_ODR_LOW = 0;
}
```

Icke-blockerande fördröjning

Skiss av programdelar



Icke-blockerande fördröjning

Implementering

mikrofördröjning:

Konfigurera SysTick för 1 mikrosekunds fördröjning och avbrott

undantags-hanteringsrutin:

Om sista mikro-fördröjningen utförd sätt systick_flag=1 annars starta ny mikrofördröjning

`delay(x)`:

initiera en räknare med antal mikrofördröjningar sätt `systick_flag`=0

```
void delay_1mikro( void )
{
  *STK_CTRL = 0;
  *STK_LOAD = ( 168 - 1 );
  *STK_VAL = 0;
  *STK_CTRL = 7;
}

static volatile int   systick_flag;
static volatile int   delay_count;

void  systick_irq_handler( void )
{
  *STK_CTRL = 0;
  delay_count -- ;
  if( delay_count > 0 ) delay_1mikro();
  else systick_flag = 1;
}

void  delay( unsigned int count )
{
  if( count == 0 ) return;
  delay_count = count;
  systick_flag = 0;
  delay_1mikro();
}
```

Icke-blockerande fördröjning med SysTick