

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Lars Hstbeck

Kärnkraft i rymden

Användningen av reaktorer och radioaktiva ämnen som
kraftkällor i satelliter och rymdsonder

Omslagsbild:

RORSAT illustrerad av Ronald C. Wittmann, 1982

Sovjetunionen placerade ut en serie av havsövervakningssatelliter utrustade med radar, s.k. RORSATs, i låg bana i början på 1967. Genom att samutnyttjas i par lokaliserade de och siktade amerikanska fartyg. Syftet var sedan att använda ryska marina styrkor för att förstöra de amerikanska fartygen. De kärnbränslestyrda RORSATs som sköts upp på 70-talet krånglade ibland, t.ex. så kraschade en RORSAT och spred radioaktivt nedfall över norra Kanada 1978.

"Courtesy of Defense Intelligence Agency Military Art Collection, The Smithsonian Air & Space Museum Exhibit, RORSAT, by Ronald C. Wittmann, 1982" <http://www.dia.mil/history/art/exhibit.html> (2008-11-07)

Titel	Kärnkraft i rymden
Title	Nuclear Power in Space
Rapportnr/Report no	FOI-R--2603--SE
Rapporttyp Report Type	Underlagsrapport Base data report
Sidor/Pages	36 p
Månad/Month	November/November
Utgivningsår/Year	2008
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	
Forskningsområde Programme area	3. Skydd mot CBRN och andra farliga ämnen 3. Protection against CBRN and other hazardous substances
Delområde Subcategory	34 Internationell säkerhet 34 International Security
Projektnr/Project no	A290131
Godkänd av/Approved by	Magnus Oskarsson
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Försvars- och säkerhetssystem	Defence & Security, Systems and Technology
164 90 Stockholm	SE-164 90 Stockholm

Förord

Ursprunget till denna rapport var en fråga från Statens Strålskyddsinstitut, SSI, angående risken för att radioaktivt material från en satellit faller ner i Sverige. Detta är ett riskscenario som bygger på händelsen i januari 1978 då delar av en kärnreaktor ombord på den sovjetiska havsövervakningssatelliten Kosmos 954 slog ned i Kanada. Scenariot fick förnyad aktualitet då delar av en liknande satellit, Kosmos 1402, hotade att träffa Sverige i slutet av januari 1983.

Reaktorer används inte längre i rymdobjekt men energikällor baserade på värmeutvecklingen från radioaktivt sönderfall är fortfarande vanliga. En sådan brann upp i stratosfären 1964 och under många år kunde plutonium-238 mätas upp i dessa luftlager.

Efter den första frågan från SSI för drygt ett år sedan kom fler frågor från olika håll. Uppenbarligen finns det ett intresse för frågeställningar kring satelliter med nukleära kraftkällor. Även om svaren är lätta att ta fram via befintlig litteratur och inte minst via Internet så framstod det som rimligt att i rapportform sammanfatta denna kunskap. Trots att det inte finns en speciell användare som efterfrågat precis allt det som rapporten beskriver hoppas jag att de olika intressenter som hört av sig vid olika tillfällen och med olika frågor under det gångna året har nytta inte bara av ”sina” besvarade frågor utan även av övrig information.

Stockholm, augusti 2008

Lars Höstbeck

Sammanfattning

Idag är solceller den vanligaste tekniken för att kraftförsörja en satellit. Solceller fungerar så länge behovet av kraft är begränsat och satelliten dels kan utrustas med tillräckligt med solceller, dels ligger i en sådan bana att tillräckligt med solljus faller på solcellerna.

Ett antal projekt uppfyller inte dessa kriterier. I sådana fall kan problemet hanteras med kärnteknik och redan 1961 placerades den första satelliten med en nukleär kraftkälla i omloppsbanan.

Av sjuttio kända satelliter eller rymdsonder som utnyttjat kärnteknik så har tio råkat ut för någon form av haveri. I inget fall har dock haveriet berott på den kärntekniska komponenten. Denna rapport avser att belysa frågeställningen *I vilken utsträckning utgör rymdobjekt med nukleära kraftkällor en potentiell risk för radioaktiv kontaminering i Sverige?* Det är alltså inte en diskussion för eller emot kärnkraft i rymden. Det är inte heller en värdering av konsekvenserna om radioaktivt material från en satellit skulle nå jordytan.

Historiskt har två olika typer av nukleära kraftkällor, *Nuclear Power Sources* (NPS), använts för att generera elektricitet i rymden. Det är dels reaktorer där energin alstras genom klyvning av ^{235}U , dels så kallade *Radioisotope Thermoelectric Generators* (RTG) där elektricitet alstras ur värmen från naturligt sönderfallande radionuklider. De enda länder som använt NPS i rymden är USA och Sovjetunionen (samt i ett misslyckat fall Ryssland).

Nukleära kraftkällor har använts i tre typer av rymdobjekt: satelliter, rymdsonder och landare (månen/Mars). USA har skjutit upp en reaktor i försökssyfte. All övrig amerikansk användning avser RTG. Sovjetunionen har tvärtom bara skjutit upp några enstaka RTG men nära fyrtio reaktorer. Sovjets nyttjande av NPS är betydligt mindre transparent än USAs. En del av det som finns publicerat är mer eller mindre väl underbyggda bedömningar.

Det är troligt att även framtida rymdsonder, mån- och marslandare kommer att nyttja nukleära kraftkällor. Förutom de tidigare aktörerna USA och Sovjetunionen (idag Ryssland) kan vi förvänta oss nukleära system från Kina, Indien och kanske också ESA (European Space Agency).

År 1992 antog FN:s generalförsamling en resolution med principer för användning av nukleära kraftkällor i rymden. Resolutionen tar upp elva punkter som slår fast såväl definitioner av ingående termer som när och hur NPS får användas, hur olyckor skall anmälas och hur kompensation för skador till följd av olyckor skall hanteras.

Risken för nedfall av nukleärt material i Sverige till följd av en incident som involverar en satellit eller rymdsond bedöms vara mycket liten. Dock kommer allt som någon gång placerats i omloppsbanan förr eller senare falla tillbaka till jorden. Som mått på

risken att drabbas av nedfall kan därför inte enbart framtida nedfall väljas. Istället har här valts ”nedfall inom 100 år”.

Givet att ingen nation återupptar nyttjandet av NPS i låga banor skulle två typfall kunna urskiljas:

- Inom cirka 3 000 år kommer alla de satelliter som idag ligger i så kallad *Nuclear Safe Orbit* (NSO) att återinträda i jordatmosfären. En satellit, Triad 0I-1X ligger i en lägre bana och kommer därför att återinträda före de övriga. Sannolikheten att det sker inom 100 år bedöms vara så låg att det inte är meningsfullt att ta fram ett kvantitativt värde.
- Det finns en risk för att en uppskjutning av en satellit eller rymdsond med nukleärt material misslyckas och att detta material då faller ner över Sverige. Detta är ingen stor risk, men den bedöms ändå vara en eller flera storleksordningar större än risken för att en satellit som idag befinner sig i NSO skall slå ner i Sverige inom 100 år.

Om nyttjandet av NPS i låga banor återupptas gäller ovanstående sannolikheter inte längre.

Nyckelord: Rymd, Satellit, Kärnenergi, Risk, Radioaktivitet, Nedfall

Summary

Today solar panels are the most common technique to supply power to satellites. Solar panels will work as long as the power demand of the satellite is limited and the satellite can be equipped with enough panels, and kept in an orbit that allows enough sunlight to hit the panels.

There are various types of space missions that do not fulfil these criteria. With nuclear power these types of missions can be powered regardless of the sunlight and as early as 1961 the first satellite with a nuclear power source was placed in orbit.

Out of seventy known space missions that has made use of nuclear power, ten have had some kind of failure. In no case has the failure been associated with the nuclear technology used. This report discusses to what degree satellites with nuclear power are a source for potential radioactive contamination of Swedish territory. It is not a discussion for or against nuclear power in space. Neither is it an assessment of consequences if radioactive material from a satellite would reach the earth's surface.

Historically two different kinds of Nuclear Power Sources (NPS) have been used to generate electric power in space. The first is the reactor where the energy is derived from nuclear fission of ^{235}U and the second is the Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG) where electricity is generated from the heat of naturally decaying radionuclides. NPS has historically only been used in space by United States and the Soviet Union (and in one failing operation Russia).

Nuclear Power Sources have been used in three types of space objects: satellites, space probes and moon/Mars vehicles. USA has launched one experimental reactor into orbit, all other use of NPS by the USA has been RTG:s. The Soviet Union, in contrast, only launched a few RTG:s but nearly forty reactors. The Soviet use of NPS is less transparent than the use in USA and some data published on Soviet systems are more or less well substantiated assessments.

It is likely that also future space probes, moon and Mars vehicles will be using NPS. Besides the more established users of NPS in space, USA and Soviet Union (today Russia), it is possible that we in a not to distant future will see use of NPS in space by China, India and maybe also ESA (European Space Agency).

In 1992 the United Nations General Assembly adopted a resolution regarding principles for the use of NPS in space. The resolution consists of eleven points regarding definitions and usage of NPS in space, and how to handle notification and compensation in case of damages due to a failure involving a satellite with an NPS.

The probability of radioactive fallout in Sweden following an incident with a NPS-equipped satellite is very small. Due to the fact that everything placed in orbit around Earth sooner or later will re-enter, it is not possible to use *probability of re-entry* at any

time as a measure of risk. Instead the measure *Probability of re-entry within 100 year has been chosen.*

If the routine use of NPS in Low Earth Orbit (LEO) is not taken up again two cases can be defined:

- Within about 3 000 years all satellites stored in *Nuclear Safe Orbit (NSO)* will de-orbit and re-enter the Earth atmosphere. One satellite, Triad OI-IX is in orbit at a lower altitude, and will thus de-orbit earlier. The probability that it does re-enter within 100 years from now is so small that a quantitative measure is deemed not to be meaningful.
- There is a risk of a launch failure involving a satellite or space probe with a NPS, with a risk of fallout in Sweden. This is not a large risk, but it is orders of magnitude higher than the probability of a satellite that now is in NSO will end up in Sweden within 100 years.

If the routine use of NPS in LEO is re-established, the probabilities above are no longer valid.

Keywords: Space, Satellite, Nuclear Power Source, Risk, Radioactivity, Fallout

Innehållsförteckning

Förkortningar	11
1 Bakgrund	13
2 Kärnkraft i rymden	15
3 Användning av reaktorer och RTG	17
3.1 USA:s program.....	17
3.2 Sovjetunionens/Rysslands program.....	19
3.3 Framtida användning av kärnkraft i rymden.....	22
3.4 Internationellt regelverk.....	22
4 Tidigare olyckshändelser	23
4.1 Nedslag efter uppnådd omlopps bana.....	23
4.1.1 Kosmos-300 och -305 (1969).....	23
4.1.2 Apollo 13 (1970).....	23
4.1.3 Kosmos 954 (1977).....	23
4.1.4 Kosmos 1402 (1982).....	23
4.1.5 Kosmos 1900 (1987).....	24
4.2 Misslyckade uppskjutningar.....	24
4.2.1 Transit 5BN-3 (1964).....	24
4.2.2 Nimbus B-1 (1968).....	25
4.2.3 US-A (1969).....	25
4.2.4 US-A (1973).....	25
4.2.5 Mars-96 (1996).....	25
5 Risk för återinträde	26
6 Risker vid uppskjutning	28
7 Sannolikhet för nedslag i Sverige	30
7.1 Satellit i bana återinträder och slår ner i Sverige.....	30
7.2 Uppskjutning misslyckas och nedslag sker i Sverige.....	31
8 Avslutande observationer	32
9 Litteraturförteckning	33
9.1 Böcker.....	33
9.2 Artiklar.....	33
9.3 Internet.....	33
9.3.1 Websidor.....	33
9.3.2 Webartiklar.....	34

Bilaga 1 - Halveringstider	35
Bilaga 2 - Satellitbanor	36

Förkortningar

ALSEP	Apollo Lunar Scientific Experimental Package
COSPAR	Committee On Space Research
ESA	European Space Agency
GEO	Geostationary Earth Orbit
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LEO	Low Earth Orbit
LES	Lincoln Experimental Satellite
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NORAD	North American Aerospace Defense Command
NPS	Nuclear Power Supply
NSO	Nuclear Safe Orbit (Nuclear Storage Orbit)
RHU	Radioisotope Heater Unit
RORSAT	Radar Ocean Reconnaissance Satellite
RTG	Radioisotope Thermoelectric Generator
SNAP	System for Nuclear Auxiliary Power
UNOOSA	United Nations Office for Outer Space Affairs
US-A	Upravlyaernyj Sputnik – Aktivnyj (Ung. Kontrollerad satellit – aktiv)

1 Bakgrund

Kraftförsörjning för rymdsystem är i många fall en utmaning. Det idag vanligaste sättet att försörja en satellit är med solceller. Detta fungerar så länge behovet av kraft är begränsat, satelliten kan utrustas med tillräckligt med solceller och ligger i en sådan bana att tillräckligt med solljus faller på solcellerna.

Ett antal projekt uppfyller inte dessa kriterier. De två typfallen är satelliter i bana runt jorden som kräver mer energi än vad solceller kan ge samt interplanetära rymdsonder som skall färdas långt från solen där solljuset inte räcker till.

Rymdteknik och kärnteknik är bägge resultat av den teknikutveckling som skedde under och omedelbart efter andra världskriget. De kan i någon mening anses ha utvecklats parallellt och redan under 1950-talet började man titta på kärnteknik som skulle kunna nyttjas i rymden. Med kärnteknik skulle bägge typfallen då solceller inte räcker till kunna hanteras.

Redan 1961 placerades den första satelliten med en nukleär kraftkälla, *Nuclear Power Source* (NPS), i omloppsbana, den amerikanska navigationssatelliten TRANSIT 4A. Därefter har följt såväl amerikanska som sovjetiska system. Totalt har NPS använts i sjuttio kända satelliter eller rymdsonder och åtskilliga av de system som sänts upp ligger idag i omloppsbana runt jorden.

Nyttjandet av kärnteknik, och därmed radioaktivt material, medför risker såväl vid uppskjutning som då utplacerade system återinträder i jordatmosfären. Att det finns en medvetenhet om dessa risker visar debatten kring uppskjutningen av Cassini-Huygenssonden 1997.¹

Det värde som NPS tillför rymdsystemen är idag svårt att ersätta med annan teknik och allt pekar på att NPS kommer att fortsätta att användas i rymden. För att hantera riskerna kring det antog FN redan 1992 en serie principer kring kärnteknik i rymden.²

Av de sjuttio satelliter och rymdsonder som nyttjat kärnteknik så har tio råkat ut för någon form av haveri. I inget fall har dock haveriet berott på den kärnteknik som nyttjats. Denna rapport avser att belysa frågeställningen *I vilken utsträckning utgör satelliter med nukleära kraftkällor en potentiell risk för radioaktiv kontaminering i Sverige?*

Avsnittet *Kärnkraft i rymden* ger en kort bakgrund till vilka tekniker som finns och hur de nyttjas. Här beskrivs vilka radionuklider som kommit till användning och ungefär i hur stor mängd för de olika typerna av system. Det görs däremot inte någon värdering av de doser och dosintekningar som uppkommer då dessa sprids ut i jordens ekosystem.

I *Användning av reaktorer och RTG* beskrivs dels det historiska nyttjandet av NPS i de amerikanska och sovjetiska programmen med tabeller över alla de system som utnyttjat NPS, dels förväntningar och förutsättningar för framtida användning av NPS i rymden. Här refereras också kortfattat innehållet i de av FN antagna principerna för användning av kärnteknik i rymden.

Under rubriken *Tidigare olyckshändelser* beskrivs några av de fall då en satellit eller rymdsond med radioaktivt material havererat, eller återinträtt i, jordatmosfären. Beskrivningarna fokuserar på rymdsystemen och vad som hände med det radioaktiva materialet men konsekvenserna i de fall då spridning av radioaktivitet förkommit

¹ Se till exempel *Much ado about Cassini's Plutonium*, CNN Sci-Tech Story Page, 1997-10-10, tillgänglig via www.cnn.com/tech/9710/10/cassini.advancer/, kontrollerad 2008-06-27.

² *UN Principles Relevant to the Use of Nuclear Power Sources In Outer Space*, FN-resolution 47/68, 1992.

diskuteras inte. Beskrivningen är uppdelad i två kategorier, återinträde efter det att satelliten legat i omloppsbanan respektive misslyckad uppskjutning. Denna indelning motsvarar också den följande diskussionen om risker vid nyttjandet av NPS i rymden.

Avsnittet *Risk för återinträde* innehåller en i huvudsak kvalitativ diskussion kring riskerna för att ett system med NPS som idag ligger i omloppsbanan skall återinträda i jordatmosfären. Eftersom det är helt säkert att de objekt som idag ligger i jordens gravitationsfält förr eller senare kommer att återinträda i jordatmosfären måste ett mer meningsfullt mått än bara risk för återinträde definieras. Det mått som valts är risk för återinträde inom hundra år.

Den andra kategorin av risk, som bedöms vara den större, är det som diskuteras i avsnittet *Risker vid uppskjutning*. Även här är det en i huvudsak kvalitativ diskussion kring vilka nationer och organisationer som kan förväntas ta sig an projekt som kräver NPS och varifrån en sådan uppskjutning i så fall sker.

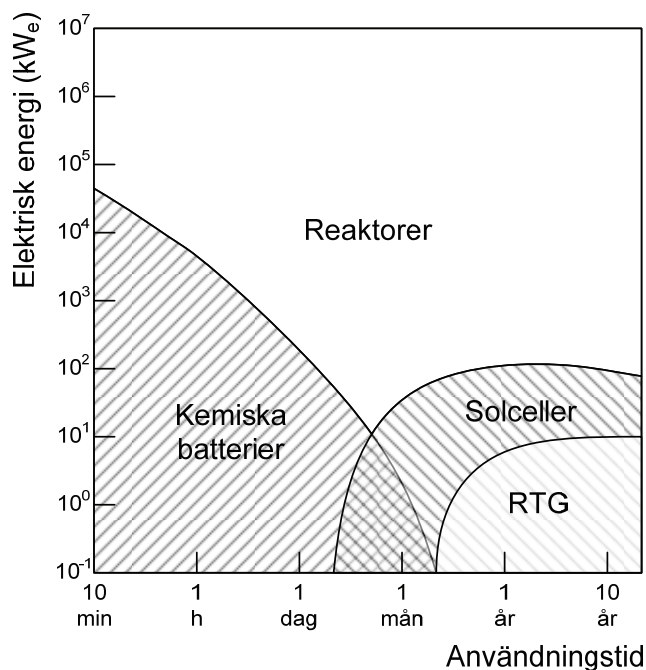
Ett försök till kvantitativ diskussion återfinns i avsnittet *Sannolikhet för nedslag i Sverige*. De två huvudkategorierna som nämns ovan diskuteras var och en för sig, med stöd av enkla beräkningar som inte gör anspråk på att vara exakta.

Den information som finns i rapporten, speglad mot utvecklingen på rymdområdet i stort diskuteras slutligen i form av några *Avslutande observationer*.

2 Kärnkraft i rymden

Två olika typer av nukleära kraftkällor har använts i rymden. Det är dels reaktorer där energin alstras genom klyvning av ^{235}U , dels så kallade *Radioisotope Thermoelectric Generators* (RTG) där elektricitet alstras ur värmen från naturligt sönderfallande nuklider. Den radionuklid som normalt används i RTG är plutonium-238 även om försök (de flesta jordbundna) också gjorts med polonium-210, cerium-144, curium-242 and strontium-90.^{3, 4, 5, 6} De länder som hittills utnyttjat NPS i rymden är USA och Sovjetunionen. Utöver reaktorer och RTG för att alstra elektricitet har hundratals så kallade *Radioisotope Heater Units* (RHU) använts för att värma komponenter i rymdsystem. En typisk RHU innehåller något eller några få gram ^{238}Pu , vilket bara är någon promille av innehållet i en RTG. Ett exempel är Saturnussonden Cassini-Huygens som utöver tre RTG också innehåller 157 RHU.⁷

Den ”normala” kraftkällan för en satellit är solceller och kärnenergi används bara då solceller inte bedöms räcka till (Figur 1). Detta inträffar typiskt i två fall, då man vill nyttja en hög effekt kontinuerligt under en längre tid eller då systemet skall färdas längre ut i, eller till och med ut ur, solsystemet. I dessa fall blir den infallande effekten på solcellerna för svag.



Figur 1. Schematisk bild av lämpligheten hos olika energikällor för rymdsystem beroende på systemets förväntade livslängd. Observera att möjligheten att nyttja solceller även är beroende av avståndet till solen.

Kärnreaktorer för rymdbruk baseras likt jordbundna reaktorer på fission av ett klyvbart material där den utvecklade värmen används för att generera elektricitet. Alla hittills

³ Utöver ^{238}Pu antas även en mindre mängd ^{239}Pu följa med.

⁴ Nicolas L. Johnson, *Nuclear power supplies in orbit*, Space Policy, Augusti 1986.

⁵ Se bilaga 1 för halveringstider.

⁶ A.K. Hyder, R.L. Wiley, G. Halpert, D.J. Flood and S. Sabripour, *Spacecraft Power Technologies*, Imperial College Press, 2000.

⁷ Enligt NASAs miljöanmälan till *US Environmental Protection Agency* (EPA), www.epa.gov/fedregstr/EPA-IMPACT/1997/March/Day-10/i5735.htm, kontrollerad 2008-06-27.

operationella och projekterade rymdreaktorer har använt höganrikat uran, de flesta utan moderator, vilket innebär att de är s.k. snabba reaktorer. Detta gällde dock inte den första, SNAP10A, vilket hittills är USAs enda reaktor i rymden, uppskjuten i april 1965. Det gäller inte heller den ryska Topazreaktorn som 1987 följde med radsatelliterna Kosmos 1818 och Kosmos 1867 ut i låg bana för havsövervakning. Båda dessa var termiska reaktorer med zirkonhydrid som moderator.

De flesta rymdreaktorerna (36 st) var snabba och användes av Sovjetunionen mellan 1971 och 1988 för kraftkrävande (några kW_e) radarutrustning i lågflygande havsövervakningssatelliter (US-A/RORSAT-serien, se nedan). De var av modellen BUK ("bokträd" på ryska) som genererade 100 kW_{th} och 3 kW_e via termoelektriska generatorer. Dessförinnan gjordes experiment med en äldre reaktortyp, Romashka som levererade ca 30 kW_{th} och 0.5 kW_e.^{8,9}

BUK och Topaz reaktorerna vägde ca 1 ton varav ca 30 kg utgjordes av bränsle. Som kylmedel användes flytande Natrium-Kalium, NaK. Värmen omvandlades direkt till elektricitet genom termoelektriska effekter i BUK och genom termojoniska effekter i Topaz. I den amerikanska SNAP 10 gick kylmediet genom en turbin kopplad till en generator.¹⁰

I en RTG nyttjas värmen från naturligt sönderfallande radionuklider. Det innebär en enklare konstruktion men också mindre energi till följd av lägre temperaturer. Vilken nuklid som används blir en följd av hur länge man vill att RTG:n skall vara i drift och hur mycket energi man behöver få ut. Den absolut vanligaste är ²³⁸Pu, en alfastrålare med en halveringstid på 87,7 år vilket gör den lämpad för RTG i rymdsonder som skall vara på väg under många år. Alla 45 amerikanska RTG:er och de enda ryska laddades med ²³⁸Pu medan de fyra sovjetiska¹¹ använde ²¹⁰Po som har en mycket kort halveringstid och därmed också ett högt specifikt energiinnehåll.

I en RTG omvandlas värme till elektricitet genom termoelektriska effekter. Typiska RTG:er väger mellan 10 och 50 kg och producerar upp till några hundra watt elektrisk energi. Bränslet utgör bara en liten del av denna vikt. Ett exempel är Rymdsonden Cassini som hade tre RTG på vardera ca 50 kg med ca 10 kg plutonium-238. Ett annat exempel är RTG av typen SNAP 9 som användes på Transit-5 satelliterna. En SNAP 9 vägde ca 12 kg varav 1 kg var plutonium-238. I de fyra sovjetiska RTG:er som använde polonium-210 rörde sig bränslemängden om endast 1 à 2 gram p.g.a. den korta halveringstiden och den därav följande höga specifika aktiviteten.

⁸ D.M. Rowe, *Thermoelectrics Handbook*, CRC/Taylor & Francis, 2006.

⁹ J.-C. Mandeville, L.-M- Perrin and A. Vuillemin, *Space borne photometry perturbations from solar light scattered debris a first estimate*, Acta Astronautica, vol. 48, p.229, 2001

¹⁰ R. Townsend Reese och Charles P. Vick, *Soviet Nuclear Powered satellites*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 36, 1983

¹¹ Arthur B. Chmielewski, Alexander Borshchevsky, Robert Lange, Beverly Cook, *A Survey of Current Russian RTG Capabilities*, Jet Propulsion Laboratory, Monterey, CA, 1994, tillgänglig via <http://hdl.handle.net/2014/34548>, kontrollerad 2008-09-08.

3 Användning av reaktorer och RTG

Rymdteknik och kärnkraft är bägge resultat av den teknikutveckling som skedde under och omedelbart efter andra världskriget. Det tyska V-2 programmet¹² visade att det gick att omsätta teorier kring missiler till verklighet och de senare missilprogrammen i USA och Sovjetunionen innebar en parallell utveckling av missiler som kärnvapenbärare och bärraketer för satelliter.

Manhattanprojektet hade visat att kärnenergi var möjlig att nyttja och samtidigt som kärnvapen utvecklades så pågick också en utveckling av kärnkraft för både civila och militära ändamål. Det får väl anses ganska naturligt att de två teknikområdena missiler och kärnvapen kopplades ihop väldigt tidigt och redan i slutet av 1950-talet hade man börjat titta på kärnkraft för bruk i rymden. Förutom som kraftkälla för satelliter har även kärndrivna raketmotorer studerats. De senare tas dock inte upp i denna rapport.

3.1 USA:s program

I juni 1961 sköt USA upp den första RTG:n i rymden på satelliten TRANSIT 4A. USA har skjutit upp 41 RTG:er och en reaktor som tillsammans har försett 24 olika rymdprojekt med kraft.¹³ Ytterligare fyra RTG:er i tre uppskjutningar havererade. USA:s nukleära kraftkällor i rymden kallas SNAP, vilket ska tydas *System for Nuclear Auxiliary Power*. De olika kraftkällorna betecknas SNAP-# där # är ett löpnummer. Jämna nummer används till reaktorer och udda till RTG.

Nukleära kraftkällor har använts i tre typer av rymdprojekt: satelliter, rymdsonder och landare (månen/Mars). De amerikanska satelliter som använt sig av RTG, samtliga med ²³⁸Pu, var i första hand sex satelliter i TRANSIT/TRIAD-serien. Dessa var positioneringssatelliter i LEO¹⁴ och föregångare till dagens NAVSTAR/GPS-satelliter.¹⁵ Utöver dessa har RTG nyttjats i två meteorologiska satelliter i Nimbuserien (LEO), varav en aldrig nådde omloppsbanan, och i två kommunikationssatelliter kallade LES 8 och LES 9 i GEO. USA:s enda reaktor i omloppsbanan, kallad SNAP-10, på satelliten Snapshot, sköts upp i april 1965 och var i drift 43 dagar innan ett tekniskt fel stängde reaktorn. Satelliten var ett försök med en reaktor i rymden som inte fick några efterföljare. Den här reaktorn och 11 RTG:er i 8 amerikanska satelliter ligger fortfarande i bana runt jorden.

Det finns ingenting i litteraturen kring nyttjandet av NPS som tyder på att USA skulle ha använt nukleära kraftkällor för spaningssatelliter i låga banor.

Rymdsonderna Pioneer 10 och 11, Voyager 1 och 2, Galileo, Ulysses, Cassini och New Horizons använder alla RTG som kraftkälla. Ulysses¹⁶ ligger i en polär bana runt solen, Galileo bröts sönder i Jupiters atmosfär i september 2003 och Cassini ligger i bana runt Saturnus. De övriga sondererna befinner sig idag i solsystemets utkanter.

Vid månlandningarna användes RTG för de så kallade ALSEP, *Apollo Lunar Surface Experiment Packages*. Detta var ”paket” av vetenskapliga instrument som lämnades kvar på månen efter månlandningarna och fortsatte att skicka data till jorden efter det att astronauterna återvänt. ALSEP följde med Apollo 12 till 17 och nyttjade en RTG kallad SNAP 27. Viking 1

¹² Den tyska utvecklingen av ballistiska missiler under andra världskriget, där V-2 var den enda som användes operativt, kan ses som den praktiska grunden för kommande missiler och bärraketer som utvecklades av andra världskrigets segrarmakter.

¹³ Gary L. Bennett, *Space Nuclear Power: Opening the Final Frontier*, AIAA, 2006

¹⁴ Se bilaga 2 för definition av LEO, MEO och GEO.

¹⁵ NAVSTAR-satelliterna använder inte nukleära kraftkällor.

¹⁶ Ulysses hade en förväntad livslängd på fem år men har nu överlevt i 17,5 år. Ulysses-missionen avslutades officiellt den 1 juli 2008. http://www.esa.int/esaSC/SEM_TDTUG3HF_index_0.html, kontrollerad 2008-06-30.

och 2 medförde vardera två RTG:er till Mars. Tabell 1 nedan ger en sammanställning av amerikanska NPS som har skjutits upp under årens lopp.

Tabell 1. Lista över 46 amerikanska NPS:er som skjutits upp. COSPAR/NORAD-nummer anges enbart, när sådana finns, för de objekt som för närvarande (2008) finns i bana runt jorden. Samtliga utom Snapshot avser RTG:er laddade med ²³⁸Pu. Siffran i hakparentes anger antalet i de fall då flera RTG funnits/finns ombord.

Satellit	COSPAR	NORAD	Uppskjuten	Perigeum (km)	Kommentar
TRANSIT 4A	-	00116	1961-06-29	869	
TRANSIT 4B	-	00202	1961-11-15	949	
TRANSIT 5BN-1	1963-038B	00670	1963-09-28	1 063	
TRANSIT 5BN-2	1963-049B	00704	1963-12-05	1 057	
TRANSIT 5BN-3			1964-04-21		Uppskjutningen misslyckad.
SNAPSHOT	1965-027	01314	1965-04-03	1 272	Reaktor
NIMBUS B-1 [2]			1968-05-18		Uppskjutningen misslyckad.
NIMBUS III [2]	1969-037A	03890	1969-04-14	1 071	
APOLLO 12			1969-11-14		Står på månen.
APOLLO 13			1970-04-11		Haveri. RTG störtad i Stilla havet.
APOLLO 14			1971-01-31		Står på månen.
APOLLO 15			1971-07-26		Står på månen.
PIONEER 10 [4]			1972-03-02		Bortom Pluto.
APOLLO 16			1972-04-16		Står på månen.
TRIAD 01-1X	1972-069A	06173	1972-09-02	700	
APOLLO 17			1972-12-07		Står på månen.
PIONEER 11 [4]			1973-04-05		Utanför solsystemet
VIKING 1 [2]			1975-08-20		Står på Mars.
VIKING 2 [2]			1975-09-09		Står på Mars.
LES 8 [2]	1976-023A	08746	1976-03-14	35 744	GEO 106° W
LES 9 [2]	1976-023B	08747	1976-03-14	35 686	GEO 106° W
VOYAGER 2 [3]			1977-08-20		I solsystemets utkant.
VOYAGER 1 [3]			1977-09-05		I solsystemets utkant.
GALILEO [2]			1989-10-18		I Jupiters atmosfär.
ULYSSES			1990-10-06		I bana runt solen.
CASSINI [3]			1997-10-15		I bana runt Saturnus.
New Horizons			2006-01-19		Passerade 2007 Jupiter på väg mot Pluto.

3.2 Sovjetunionens/Rysslands program

Sovjetunionen/Ryssland har i motsats till USA bara skjutit upp några enstaka RTG:er men nära fyrtio reaktorer. Sovjets nyttjande av NPS har varit betydligt mindre transparent än USA:s och en hel del av det som finns publicerat är mer eller mindre väl underbyggda bedömningar. Under senare år har dock den tillgängliga informationen ökat. Två uppskjutningar av satelliter med RTG finns redovisade.¹⁷ Dessa anges som kommunikationssatelliter i Strela-serien men det har också spekulerats om att de var försök inför de RTG:er som senare användes i två misslyckade uppskjutningar av månbanor i september och oktober 1969. Den isotop som användes antas i samtliga fall ha varit ²¹⁰Po.¹⁸

Vid det misslyckade försöket att skicka en sond till Mars 1966 (Mars-96, även kallad Mars 8) nyttjades fyra RTG:er som kraftkällor för den del av nyttolasten som avsågs placeras på Mars yta. Dessa RTG drevs av ²³⁸Pu.¹⁹ Vid uppskjutningen tände inte ett av de senare stegen som det skulle och istället för att gå in i bana mot Mars gick sonden in i en bana som tog ner den långt ner i jordens atmosfär. Den kraschade i Sydamerika över ett område kring gränsen mellan Chile, Bolivia och Stilla havet.

Identifieringen av Sovjetiska satellitsystem genom dess namn är ett svårt område. Sovjets militära rymdprogram, och senare Rysslands, har valt att registrera alla satelliter, oavsett funktion som Kosmos-#, där # är ett löpnummer. Till detta finns oftast ett sovjetiskt/ryska namn för programmet som inte alltid var, eller är, känt utanför Ryssland. Under det kalla kriget valde man i väst oftast att ge varje system en NATO-beteckning utöver det verkliga ryska namnet. En och samma sovjetiska/ryska satellit kan därför vara känd både under sitt Kosmos-nummer, sitt ryska namn och sin NATO-beteckning, samt givetvis NORAD- respektive COSPAR-numren.

Under åren 1967-1988 sköts 36 havsövervakningssatelliter upp, av NATO betecknade RORSAT för *Radar Ocean Reconnaissance SATellite*. Den sovjetiska beteckningen var US-A vilket ungefär står för "Kontrollerad satellit – Aktiv". Dessa var, sannolikt med några undantag, utrustade med BUK reaktorer (se ovan) med ²³⁵U som kraftkälla.²⁰ I februari och juli 1987 skickades två satelliter upp som hade en ny experimentell reaktor, Topaz, ombord med ca 50% högre effekt. Syftet med RORSAT var att lokalisera amerikanska flottstyrkor med radar. Typisk höjd för en aktiv RORSAT var cirka 250 km och livslängden varierade mellan en dag och ett halvår. En satellit som lämnas på 250 km höjd återinträder i jordatmosfären inom några veckor. Detta ledde till ett behov av ständiga bankorrigeringar för alla RORSAT och därmed ett behov av i det närmsta kontinuerlig kommunikation med markstationen. När kontakten förlorades mellan satellit och markstation, vilket hände vid ett par tillfällen, började banan omedelbart degraderas och om kontakt inte återupprättades eller om automatiska nödsystem inte fanns eller fungerade så ledde det till att radioaktivt material nådde jorden.

För att skydda dem som arbetade med RORSAT före uppskjutningen var satelliterna utrustade med en ordentlig reaktorinneslutning och det innebar också att reaktorn skulle klara återinträdet i jordatmosfären utan att brinna upp. En återinträdande RORSAT-reaktor kunde därför förväntas nå jorden någorlunda intakt, vilket också skedde över Kanada 1978.

För att hantera problemet med återinträdande reaktorer konstruerades redan från början ett system där reaktorn separerades från satelliten på 250 km höjd. Därefter flyttades reaktorn till en *Nuclear Safe Orbit* (NSO) på cirka 950 km höjd med en inklination på 65°. Från cirka 1980 kompletterades denna rutin med att reaktorhärden också sköts ut ur reaktorn när den väl nått

¹⁷ Johnson (1986)

¹⁸ Chmielewski et al (1994)

¹⁹ Se www.iki.rssi.ru/mars96/09_mars_e.htm, kontrollerad 2008-06-27.

²⁰ Avseende US-A/RORSAT Kosmos-198, -209, -367, och 402 varierar uppgifterna om de verkligen var försedda med kärnreaktorer eller inte. Uppgifter från bland annat UNOOSA (www.unoosa.int), Encyclopedia Astronautica (www.astronautix.com), kontrollerade 2008-06-27.

NSO.²¹ De reaktorer som nyttjades använde flytande metall, NaK, i sina kylkretsar och ett flertal av de reaktorer som placerats i NSO har läckt ut kylmedel vilket har resulterat i att det på ca 950 km cirklar ett stort antal droppar radioaktiv flytande metall. Tabell 2 nedan redovisar en sammanställning av sovjetiska/ryska uppskjutningar med NPS.

Tabell 2. Lista över 42 sovjetiska och 4 ryska NPS som skjutits upp. COSPAR/NORAD-nummer anges för typobjekt av varje klass som finns i bana idag (2008). Satelliterna är utrustade med reaktorer om ej annat anges. Av reaktorerna är 34 flyttade till s.k. Nuclear Safe Orbit (NSO) på ca 950 km höjd och 4 har av olika skäl återinträtt i jordatmosfären. Från och med Kosmos 1176 (1980) är reaktor och reaktorhård separerade. För Kosmos 1176 anges COSPAR/NORAD-nummer för samtliga tre komponenter Reaktor, reaktorhård och läckande kylmedel. För övriga anges enbart satellitens ursprungliga Kosmos-nummer.

Satellit	COSPAR	NORAD	Uppskjuten	Perigeum (km)	Kommentar
Kosmos-84 Strela	1965-070E	1574	1965-09-03	1 471	RTG (²¹⁰ Po).
Kosmos-90 Strela	1965-073E	1588	1965-09-18	1 398	RTG (²¹⁰ Po).
Kosmos-198 US-A			1967-12-27		Också batteri-driven? ²²
Kosmos-209 US-A			1968-03-22		Också batteri-driven?
US-A			1969-01-25		Uppskjutningen misslyckades.
Kosmos-300			1969-09-23		RTG (²¹⁰ Po). Månsond. Återinträdde.
Kosmos-305			1969-10-22		RTG(²¹⁰ Po). Månsond. Återinträdde.
Kosmos-367 US-A			1970-10-03		NPS ²³
Kosmos-402 US-A			1971-04-01		NPS ²²
Kosmos-469 US-A	1971-117A	05721	1971-12-25	954	Bekräftad NPS.
Kosmos-516 US-A			1972-08-21		
US-A			1973-04-25		Uppskjutningen misslyckades.
Kosmos-626 US-A			1973-12-27		
Kosmos-651 US-A			1974-05-15		
Kosmos-654 US-A			1974-05-17		
Kosmos-723 US-A			1975-04-02		
Kosmos-724 US-A			1975-04-07		
Kosmos-785 US-A			1975-12-12		
Kosmos-860 US-A			1976-10-17		
Kosmos-861 US-A			1976-10-21		
Kosmos-952 US-A			1977-09-16		
Kosmos-954 US-A			1977-09-18		Nedslag i Kanada.

²¹ Johnson (1986)

²² I denna tabell återges uppgifter som stämmer med det som finns registrerat hos *United Nations Office for Outer Space Affairs* (UNOOSA) i Wien, kompletterat med uppgifter enligt Chmielewski et al (1994).

²³ Kosmos 367 och 402 anges i UNOOSAs register varit utrustade med NPS medan andra källor anger dem som batteridrivna. Denna uppfattning är sannolikt en tolkning av sovjetiska uppgifter om Kosmos 469 som den första RORSAT med NPS. En möjlig förklaring är att Kosmos 367 och 402 verkligen var utrustade med NPS, men att ingen av dem fungerade såsom avsett och därför inte erkänts som fungerande satelliter av Sovjetunionen.

Satellit	COSPAR	NORAD	Uppskjuten	Perigeum (km)	Kommentar
Kosmos-1176 US-A	1980-034A	11788	1980-04-29	875	Härd och reaktor separerade.
- Kosmos-1176	1980-034D	11971	1980-04-29	875	Reaktorhärd
- Kosmos-1176	1980-034E	27568	1980-04-29	842	Kylmedel, NaK
-Kosmos-1176	1980-034F	29019	1980-04-29	858	Kylmedel, NaK
Kosmos-1249 US-A			1981-03-05		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1266 US-A			1981-04-21		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1299 US-A			1981-08-24		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1365 US-A			1982-05-14		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1372 US-A			1982-06-01		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1402 US-A			1982-08-30		Återinträdde med reaktorhärden utskjuten ur reaktorn. Härden nedslagen i Sydatlanten.
Kosmos-1412 US-A			1982-10-02		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1579 US-A			1984-06-29		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1607 US-A			1984-10-31		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1670 US-A			1985-08-01		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1677 US-A			1985-08-23		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1736 US-A			1986-03-21		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1771 US-A			1986-08-20		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1818 US-A			1987-02-01		Härd och reaktor separerade. Experiment med Topaz.
Kosmos-1860 US-A			1987-06-18		Härd och reaktor separerade.
Kosmos-1867 US-A			1987-07-10		Härd och reaktor separerade. Experiment med Topaz.
Kosmos-1900 US-A			1987-12-12		Härd och reaktor separerade. Nära återinträde när nödsystem aktiverades.
Kosmos-1932 US-A			1988-03-14		Härd och reaktor separerade.
Mars-96 [4]			1996-11-16		Fyra RTG (^{238}Pu). Uppskjutningen misslyckades.

3.3 Framtida användning av kärnkraft i rymden

Det är troligt att även framtida rymdsonder, månlandare och marslandare kommer att nyttja nukleära kraftkällor. Förutom de tidigare aktörerna USA och Ryssland kan vi förvänta oss nukleära system från Kina, Indien och kanske också ESA.

Europa och ESA har tidigare samarbetat med USA inom projekten Ulysses och Cassini-Huygens där NPS användes. Dessa projekt genomfördes under USA:s regelverk. Dock har ESA översiktligt studerat frågor kring NPS för europeiska system.²⁴

3.4 Internationellt regelverk

År 1992 antog FN:s generalförsamling en resolution med principer för användning av nukleära kraftkällor i rymden.²⁵ Resolutionen tar upp elva principer som slår fast såväl definitioner av ingående termer som när och hur NPS får användas, hur olyckor skall anmälas och hur kompensation för skador till följd av olyckor skall hanteras. I mångt och mycket är principerna återupprepningar av vad som stadgas i övriga rymdkonventioner, särskilt *Outer Space Treaty*²⁶ och *Liability Convention*²⁷. Punkter som är specifika för principerna om nyttjande av nukleära kraftkällor är i korthet:

Riktlinjer och kriterier för säker användning (princip 3) – Användningen av nukleära kraftkällor skall begränsas till sådana projekt där andra kraftkällor inte rimligtvis kan användas.

Reaktorer får användas på interplanetära rymdsonder, i ”tillräckligt” höga banor och i låga banor om de efter avslutat uppdrag placeras i en tillräckligt hög bana.

RTG får användas på interplanetära sonder eller andra objekt som lämnar jordens gravitationsfält. De får också användas i omloppsbana runt jorden om de efter avslutat uppdrag placeras i en hög bana.

Säkerhetsbedömning (princip 4) – En säkerhetsbedömning skall göras före varje projekt som nyttjar en NPS. Denna bedömning skall göras offentligt tillgänglig så tidigt som möjligt före en uppskjutning.

Anmälan om återinträde (princip 5) – Varje nation som skjuter upp en satellit med en nukleär kraftkälla ombord skall om det finns risk för återinträde anmäla detta *in a timely fashion*. En sådan anmälan skall bland annat innehålla bästa kunskap om var nedslag kommer att ske samt vilka radioaktiva ämnen som finns ombord och i vilka mängder.

Anmälan skall göras så snart en funktionsstörning är känd och anmälan skall uppdateras vartefter ny kunskap kommer fram.

Assistans (princip 7) – Uppskjutande nation skall omedelbart erbjuda drabbade nationer assistans, och lämna sådan assistans om så begärs av de drabbade. Övriga stater med tillräcklig kunskap skall vid begäran lämna assistans till drabbade nationer.

²⁴ Se till exempel www.esa.int, *General Studies Program*, Basic 05B06, kontrollerad 2008-06-27.

²⁵ *Principles Relevant to the use of Nuclear Power Sources in Outer Space*. Principerna finns att läsa på <http://www.unoosa.org/oosa/SpaceLaw/nps.html>, kontrollerad 2008-06-30

²⁶ Det fullständiga namnet är *Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, Including the Moon and Other Celestial Bodies* och det trädde i kraft i oktober 1967.

²⁷ Det fullständiga namnet är *Convention on International Liability for Damage Caused by Space Objects* och det trädde i kraft i september 1972.

4 Tidigare olyckshändelser

4.1 Nedslag efter uppnådd omlopps bana

4.1.1 Kosmos-300 och -305 (1969)

Kosmos-300 och -305 var två sovjetiska obemannade månfärder som sköts upp den 23 september respektive 22 oktober 1969. Bägge nådde omlopps bana runt jorden men återinträdde några dagar senare i jordens atmosfär där de brann upp. Det sannolika skälet till återinträdet var att det raketsteg som skulle föra månlandarna från LEO till en bana mot månen inte fungerade som de skulle. Bägge månlandarna antas ha haft RTG med ^{210}Po ombord och efter bägge incidenterna uppmättes förhöjda halter av radioaktivitet i atmosfären.²⁸

4.1.2 Apollo 13 (1970)

Månlandaren på Apollo 13 som sköts upp i april 1970 var utrustad med en RTG av typen SNAP 27. RTG var en del av *Apollo Lunar Scientific Experimental Package* (ALSEP) och var avsedd att lämnas på månen då astronauterna återvände. I och med problemen med Apollo 13 kom månlandaren att separeras från kommandomodulen i jordatmosfären istället för på månen. Månlandaren återinträdde över Stilla Havet och slog ner i närheten av Tonga där den fortfarande ligger. Några förhöjda halter av radioaktivitet har inte kunnat mätas upp.²⁹

4.1.3 Kosmos 954 (1977)

Kosmos 954 är den mest uppmärksammade incidenten med NPS i rymden. Satelliten var en US-A/RORSAT som sköts upp den 18 september 1977. Efter 43 dagar, den 1 november 1977 slutade satelliten att göra de bankorrigeringar som är nödvändiga för att hålla den i bana på 250-270 km höjd och den 24 januari 1978 slog rester av satelliten ner i norra Kanada. Uppgifterna går i sär huruvida olyckan var en följd av en misslyckad separation av satellit och reaktor, eller om satelliten slutade fungera och återinträdde i sin helhet.³⁰ Att satelliten bara hade en operativ livstid på 43 dagar antyder att något hände med satelliten i sig, vilket stödjer hypotesen om att olyckan inte skedde till följd av en planerad separation av satellit och reaktor.

Nedslagsplatsen i Kanada visade spår av fissionsprodukter över ett stort område (124 000 km²) men också hela delar av reaktorn kunde lokaliseras i ett ambitiöst samarbete mellan Kanada och USA vintern 1978.

4.1.4 Kosmos 1402 (1982)

Som en följd av erfarenheterna med Kosmos 954 gjordes en omkonstruktion av systemet så att reaktorn först separerades från satelliten och därefter sköts reaktorhärden ut ur reaktorn. Denna omkonstruktion användes första gången på Kosmos 1176 (1980). Kosmos 1402 sköts upp den 30 augusti 1982. Efter 120 dagar, en för US-A/RORSAT-systemet förhållandevis lång tid, misslyckades separationen av

²⁸ Johnson (1986), Chmielewski (1994), Steven Aftergood, *Background on Space Nuclear Power*, Science and Global Security, vol. 1, 1989

²⁹ Johnson (1986), Aftergood (1989)

³⁰ Johnson (1986) beskriver en sekvens som tyder på att satelliten den 1 november förlorade kontakten med markkontrollen för att därefter helt utan kontroll återinträda. Aftergood (1989) hänför olyckan till att raketerna som skulle föra den separerade reaktorn till NSO inte fungerade.

reaktorn från satelliten. Banan för satelliten och reaktorn, som fortfarande satt ihop, degraderades sakta och man valde då att skjuta ut reaktorhärden ur reaktorn. Denna del av systemet fungerade och i slutet av januari 1983 slog satellit och reaktor ned i Indiska oceanen följda av rester av reaktorhärden den 7 februari i Sydatlanten.

Inför det första nedslaget, som var nära att ske i Sverige, gjorde FOA ganska stora förberedelser för att lokalisera starka strålningskällor i naturen. Detektorer och större detektorsystem flögs över utlagda olika starka ^{137}Cs -preparat för att i praktiken studera vilka möjligheter vi hade att lokalisera reaktordelar i ett svenskt Kosmos-954 scenario. Vid den tiden fanns inga säkra uppgifter om vilken av de tre satellitdelarna som innehöll reaktorhärden och inga uppgifter om att den var konstruerad för att huvudsakligen brinna upp i stratosfären. Söndagskvällen den 23 januari 1983 då satelliten passerade Mellansverige på sitt sista varv innan den slog ned i Indiska oceanen var beredskapen hög. FOA:s radiakplan låg uppe i södra fjällen för att observera eventuella optiska signaler och samla in radionuklider från en brinnande härd. Beredskap fanns också att på bred front leta radioaktiva delar med hjälp av lokala brandkårer och flygklubbar, Statens Geologiska Undersökning (SGU) och Flygvapnet.

En intressant observation är att det var förberedelserna för flygdetektion av radioaktiva ämnen från Kosmos 1402 som gjorde att Sverige tre år senare extremt snabbt kunde kartlägga nedfallsfältet efter Tjernobylolyckan.³¹

4.1.5 Kosmos 1900 (1987)

Denna reaktorsatellit slog aldrig ner på jorden,³² men en olyckshändelse var mycket nära. US-A/RORSAT Kosmos 1900 sköts upp i december 1987. I april 1988, efter mer än 110 dagars livstid, förlorade man radiokontakten med satelliten. I och med den förlorade radiokontakten var inte längre bankorrigeringar möjliga och den 13 maj bekräftades att banan börjat degraderas. Den 30 september, kort tid innan det förväntade återinträdet aktiverades ett automatiskt säkerhetssystem som separerade reaktor och satellit, och placerade reaktorn i NSO.³³

4.2 Misslyckade uppskjutningar

4.2.1 Transit 5BN-3 (1964)

Den första misslyckade uppskjutningen av en NPS skedde den 21 april 1964 då ett raketsteg inte fungerade som det skulle. Istället för att placera den amerikanska navigationssatelliten Transit 5BN-3 i en polärbana återinträdde satelliten i atmosfären över Indiska Oceanen. RTG:en av typ SNAP 9A fungerade som avsett. Den förstördes i atmosfären varvid delarna brann upp under återinträdet. Det stöds av att mätningar i området inte visade på några förhöjda halter av radioaktivitet³⁴ samt att allt plutonium-238 från RTG:en sedermera kunde återfinnas i stratosfären.³⁵ Olyckan innebar att stratosfärens innehåll av ^{238}Pu ökade med 1 kg, vilket kan jämföras med de 0,6 kg som tidigare tillförts genom de atmosfäriska kärnladdningsproven.³⁶

³¹ Uppgifterna om den svenska beredskapen 1983 kommer från Lars-Erik De Geer, FOI.

³² Kosmos 1900 räknas därför inte in i olyckstatistiken ovan.

³³ Joel R. Primack, *Space Reactor Arms Control*, Science and Global Security, vol. 1, 1989

³⁴ Johnson (1986).

³⁵ P. Krey, *Atmospheric Burnup of a Plutonium-238 Generator*, Science Vol. 3802, 1967.

³⁶ United Nations. *Ionizing Radiation: Levels and Effects*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1972 Report to the General Assembly, United Nations, New York, 1972.

4.2.2 Nimbus B-1 (1968)

Den amerikanska vädersatelliten Nimbus B-1 innehöll två RTG:er av typen SNAP 19. Denna RTG representerade en annorlunda designfilosofi än den tidigare SNAP 9. Medan SNAP 9 var avsedd att förstöras under återinträdet så var SNAP 19 konstruerad för att klara återinträdet och nedslag på jorden utan att gå sönder och släppa ut någon radioaktivitet. När uppskjutningen av Nimbus B-1 misslyckades den 5 maj 1968 föll de två RTG:erna i havet utanför Kalifornien. Några månader senare bärgades de intakta och bränslet återanvändes ombord på satelliten Nimbus III.

4.2.3 US-A (1969)

Mycket lite information finns tillgänglig om Sovjetunionens misslyckade uppskjutning den 25 januari 1969. Ryska källor anger haveri i bärraketerna som orsaken till misslyckandet.³⁷ Satelliten skall ha varit en US-A/RORSAT som kanske var utrustad med en reaktor. Dock finns indikationer på att alla US-A före ca 1971 använde batterier. Om satelliten var utrustad med reaktor skulle det troligen ha varit en BUK med 31.5 kg ²³⁵U.

4.2.4 US-A (1973)

Denna misslyckade sovjetiska uppskjutning skedde den 25 april 1973. Nyttolasten slog ner i Stilla Havet norr om Japan.³⁸ Radioaktivitet detekterades i området av amerikanska flygplan utrustade för att ta luftprover. De olika radioaktiva isotoper som identifierades i proverna gav en del information om hur den sovjetiska reaktorn var konstruerad och vilka rutiner som användes vid uppskjutningen.

4.2.5 Mars-96 (1996)

Detta är den senaste i raden av olyckor med system som är utrustade med NPS. Sonden var rysk och avsedd för en färd till Mars. Den sköts upp den 16 november 1996 från Baikonur och ombord fanns fyra RTG:er med ²³⁸Pu.

På grund av ett fel med det tredje raketsteget, kallat Block D-2, placerades aldrig rymdsonden i den interplanetära banan mot Mars och på tredje varvet runt jorden återinträdde sonden i atmosfären och kraschade i det område där gränsen mellan Chile och Bolivia möter Stilla havet. Vad som egentligen hände blev aldrig riktigt klarlagt. En möjlig förklaring är att när bränningen av Block D-2 misslyckades försökte sonden, efter att ha separerat från Block D-2, placera sig i rätt bana med hjälp av sin egen motor. Detta misslyckades delvis för att sonden pekade i fel riktning och delvis för att den inte hade tillräckligt med bränsle. Resultatet blev en ohållbar bana med perigeum på 87 km och apogeum på ca 1500 km. Nära perigeum återinträdde sonden i atmosfären.³⁹

³⁷ www.russianspaceweb.com/us.html, kontrollerad 2008-06-30.

³⁸ Se till exempel R. Townsend Reese, Charles P. Vick, *Soviet Nuclear Powered Satellites*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 36, 1983

³⁹ Detta möjliga förlopp beskrivs av Igor Lissov och James E. Oberg i *What really happened with Mars-96?*, Federation of American Scientists, 1996-11-19, www.fas.org/spp/eprint/mars96lo.htm, kontrollerad 2008-06-30. För definition av perigeum och apogeum, se bilaga 2.

5 Risk för återinträde

Bästa bedömningen med tillgängligt material är att det finns åtta amerikanska objekt med totalt elva RTG:er med ^{238}Pu och en reaktor med ^{235}U tillsammans med 34 sovjetiska reaktorer med ^{235}U (varav 18 har separerat härden från reaktorinneslutningen) i bana runt jorden. Totalt finns alltså 42 objekt med 45 NPS:er i omloppsbanor kring jorden⁴⁰. Tre ligger i banor som aldrig passerar över Sverige (TRANSIT 4B, LES-8 och LES-9) och med undantag av den amerikanska TRIAD OI-1X bedöms samtliga ligga på höjder som ger en förväntad minsta tid till återinträde i atmosfären på mer än 400 år.

Allt som ligger i omloppsbanor runt jorden kommer förr eller senare att slå ner på jordytan. Att använda sannolikhet för nedslag som effektmått är därför meningslöst då denna givetvis alltid är precis ett. Ett mer relevant effektmått är sannolikhet för nedslag inom en viss tid. I denna korta översikt har måttet ”Sannolikhet för nedslag inom 100 år” valts som mått på risken för att Sverige skall drabbas av ett nedslag av en satellit eller rymdsond med en NPS ombord.

Avgörande för när ett nedslag sker är banans höjd och objektets egenskaper. Föremål i banor upp till ca 400 km kan, på grund av atmosfärens täthet, återinträda inom cirka sex månader om inte banorna kontinuerligt korrigeras. Över denna höjd förlängs tiden till nedslag snabbt och ett föremål i GEO kan förväntas ligga kvar i kanske 100 000-tals år eller mer. Den egenskap som påverkar livstiden är den s k ballistiska koefficienten. Enkelt uttryckt är det förhållandet mellan ett föremåls tyngd och dess yta i rörelseriktningen. Banan för ett lätt föremål med stor yta degraderas snabbt medan banan för ett tungt föremål och liten yta degraderas långsammare. Satelliter och reaktorer kan i dessa sammanhang anses vara tunga föremål vars bana degraderas någorlunda långsamt. Detta till trots så kommer de förr eller senare att slå ner på jorden.

Det finns en möjlighet för objekt i omloppsbanor att få banan ändrad till följd av kollisioner med andra objekt. För närvarande (2008) finns i banor runt jorden cirka 13 000⁴¹ föremål större än 10 cm som katalogiserats. Under de 50 år som gått sedan Sputnik-1 finns belägg för tre sådana kollisioner, involverande totalt sex objekt i en ständigt ökande population av objekt. Om populationen av föremål i omloppsbanor skulle frysas i nuvarande volym skulle vi alltså inom etthundra år kunna vänta oss ytterligare mer än sex kollisioner involverande mer än tolv ytterligare objekt.⁴²

Den troligaste effekten av en kollision är att föremålen bryts upp i flera mindre delar. Om en reaktor eller RTG bryts sönder i rymden och återinträder i mindre delar kommer de med all sannolikhet att brinna upp i atmosfären utan att slå ner på jorden. Det leder till förhöjda halter av radioaktivitet i atmosfären men inte något tydligt nedslag på jordytan.

⁴⁰ Två mer än 40 år gamla sovjetiska RTG:er, Kosmos-84 och -90 med ^{210}Po räknas ej med p.g.a poloniets korta halveringstid.

⁴¹ I februari 2007 exploderade en rysk raketmotor i bana vilket skapade mer än 1100 delar större än 10 cm. Detta kombinerat med Kinas ASAT-test i januari har ledde till en tjugoprocentig ökning av skräp under 2007. De ca 2000 nya delar som har skapades 2007 motsvarar mängden skräp som har skapades under de föregående tio åren. Under 2008 har ytterligare fragmenteringar skett, samtidigt som en del skrot återinträtt i jordatmosfären och brunnit upp.
http://www.cdi.org/program/document.cfm?DocumentID=3855&from_page=../index.cfm#3, kontrollerad 2008-07-01

⁴² Detta är en kraftig förenkling då antalet föremål i omloppsbanor ständigt ökar, samt att föremål mindre än tio centimeter också är involverade i kollisioner som kan leda till att större föremål fragmenteras, vilket ger upphov till en ständigt ökande population av rymdskrot även utan nya uppskjutningar.

I de fall då NPS har återinträtt efter att först ha uppnått omloppsbanan har det i ett fall rört sig om en bemannad månfärd (Apollo 13) där nödvändigheten i att rädda besättningen ledde till en risktagning avseende NPS, två fall har rört sig om månsonder som inte lyckats gå in i bana mot månen (Kosmos 300, 305) och i två fall om aktiva RORSAT på 250 km höjd som av någon anledning förlorat kontrollen (Kosmos 954, 1402). Några aktiva RORSAT finns inte i bana idag och risken för att någon NPS som idag finns i omloppsbanan över 800 km skulle återinträda i jordatmosfären inom 100 år bedöms som obefintlig. I UNOOSAs register⁴³ anges förväntade tider för återinträde på mellan 1000 och 2700 år.

Den amerikanska satelliten TRIAD OI-1X med 1,4 kg ²³⁸Pu ligger i en nästan exakt polär bana på 700 km höjd. Banans livslängd, beroende på bland annat ballistisk koefficient, förväntas vara mellan något tiotal och några hundratals år.⁴⁴ Även om den inte utgör något omedelbart hot finns en mycket liten, i princip okvantifierbar, risk för återinträde i jordatmosfären inom 100 år.

⁴³ Registret är tillgängligt via Internet på UNOOSAs hemsida, <http://www.unoosa.org/oosa/osoindex.html>, kontrollerad 2008-07-28.

⁴⁴ Tiden för återinträde bedömd efter uppgifter i Wertz och Larson, *Space Mission Design and Analysis 3rd ed.*, Kluwer Academic Publishers, 1999. På grund av att parametern *ballistic coefficient* är okänd för samtliga satelliter är siffran behäftad med en stor osäkerhet. Sannolikt är tiden till återinträde betydligt längre.

6 Risker vid uppskjutning

I fem fall (TRANSIT 5BN-3, NIMBUS B-1, US-A/RORSAT 1969, US-A/RORSAT 1973 och Mars-96) har haveri i samband med uppskjutningen lett till att ett system med NPS ombord har slagit ner på jorden utan att ha gått in i omloppsbana.

Vid framtida uppskjutningar av satelliter och rymdsonder med NPS utgör detta en risk som är större än risken för att någon satellit som nu ligger i bana skulle återinträda.

Sedan det kalla krigets slut har NPS endast använts i interplanetära rymdsonder. Sådana har sänts upp med en frekvens av ungefär en vart fjärde år. Och av de senaste fem har en sådan (Mars-96) misslyckats att nå bana och slagit ner på jorden.

Denna typ av rymdsonder kan förväntas skjutas upp i regi av någon av de största rymdnationerna eller organisationerna, idag USA/NASA, Europa/ESA, Ryssland/ROSCOSMOS eller Japan/JAXA. Även möjligheten med RTG på kinesiska och indiska rymdsonder måste övervägas inom fem till tio år. Under 2007/08 planerar Kina att placera en sond i omloppsbana runt månen, för att 2010-2012 göra en obemannad månlandning.⁴⁵ Sonden i omloppsbana har sannolikt inget behov av RTG medan en månlandare troligen har det. Indien planerar även att före 2020 skicka upp rymdsonder till månen och Mars samt att genomföra bemannade rymdfärder.⁴⁶

Uppskjutningarna av dessa kan förväntas ske från någon av följande platser, se även Figur 2:

- Cape Canaveral (USA)
- Vandenberg (USA)
- Kourou (ESA)
- Baikonur (Ryssland)
- Kagoshima (Japan)
- Tanegashima (Japan)
- Xichang (Kina)
- Jiquan (Kina)
- Sriharikota Island (Indien)

För varje uppskjutningsplats finns restriktioner i vilka riktningar man får skjuta upp en satellit. Dessa restriktioner är följden av säkerhetskrav avseende den närmast liggande omgivningen men har också betydelse för vilka andra områden som kan utsättas för risker vid uppskjutningar.

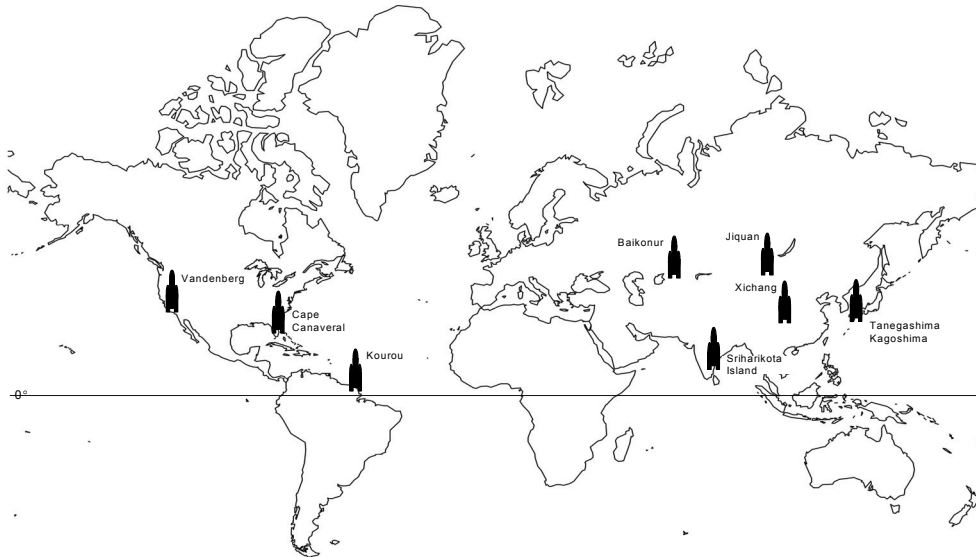
Missöden vid uppskjutning kan klassificeras efter i vilket skede problemet uppstår, eller i samband med vilket bärraketsteg. Missöden kring första raketsteget leder ofta till nedslag nära uppskjutningsplatsen till följd av att den som ansvarar för uppskjutningen väljer att förstöra raket och satellit då man får indikation på ett allvarligt fel. Ett exempel på detta är Nimbus B-1 som slog ned i havet utanför Vandenberg Air Force Base i Kalifornien.

Ett alternativ till nedslag intill uppskjutningsplatsen är att satellit och raket fortsätter i en ballistisk bana och slår ner någonstans längs med uppskjutningsriktningen. I detta

⁴⁵ <http://www.spacetoday.org/China/ChinaMoonflight.html>, kontrollerad 2008-07-01.

⁴⁶ <http://www.cdi.org/program/issue/document.cfm?DocumentID=3855&IssueID=140&StartRow=1&ListRows=10&appendURL=&Orderby=DateLastUpdated&ProgramID=68&issueID=140>, kontrollerad 2008-07-01

fall kan bärraket och satellit liknas vid en ballistisk missil och riskområdena till följd av denna typ av haveri är begränsade till den absolut längsta räckvidden för en ballistisk missil, uppskattningsvis cirka 10 000 km, och de riktningar från varje uppskjutningsplats som är acceptabla som uppskjutningsriktningar. Ett exempel på ett sådant haveri är den US-A/RORSAT som sköts upp från Baikonur den 25 april 1973 och slog ner i Stilla Havet norr om Japan.



Figur 2. De troligaste platserna för uppskjutning av framtida rymdsonder.

Nästa typ av missöden är de som uppstår när satelliten nått omloppsbanan och ett raketsteg för nästa del av banan skall tändas. För dessa kan per definition inga riskområden beräknas eftersom föremålet redan är i bana samtidigt som en misslyckad tändning av ett raketsteg inte är förutsägbar till storlek eller riktning och därför kan föra satelliten till nästan vilken ny bana som helst. Mars -96 är ett exempel på ett sådant problem vid uppskjutning.

För att dra nytta av jordrotationen för att accelerera den uppstigande bärraketen vill man skjuta upp mot öster. Som beskrivs ovan innebär uppskjutning mot öster inte att den enda risken för nedfall över Sverige kommer från uppskjutningar väster om oss. Risk för nedfall i Sverige från en uppskjutning från någon av platserna ovan beror på uppskjutningsriktning och hur tändningen av de senare raketstegen planeras. Riskerna måste bedömas från fall till fall.

Eftersom ett nedslag är en följd av en olyckshändelse, och därmed per definition något som inte var planerat är det i princip omöjligt att i förväg bedöma sannolikheten att en uppskjutning skulle innebära en risk för Sverige. I och med att varje rymdsondsuppskjutning kräver flera raketsteg är inte heller begränsningen i inklinering för den planerade uppskjutningen en säker indikator på risk eller säkerhet. En felaktighet vid tändningen av andra eller tredje steget kan leda till nya, oförutsägbara banor.

Oavsett riskerna för nedslag är rimligtvis risken för strålningsdoser minimal eftersom man i framtida uppskjutningar torde använda system med väl inkapslat bränsle som kan bärgas intakt.

7 Sannolikhet för nedslag i Sverige

Detta avsnitt är ett försök till en kvantitativ hantering av frågeställningen ur ett operationsanalytiskt perspektiv. Målet är inte en strikt matematisk beskrivning utan en uppskattning av de ungefärliga storleksordningarna. För att uppnå detta görs ett antal antaganden som uppskattningsvis är tillräckligt bra för att få fram ett svar på frågan om risken för nedslag i Sverige av radioaktivt material från satelliter och rymdsonder.

Antagande 1 – Sveriges yta. Sveriges yta, 440 000 kvadratkilometer utgör 0,1 % av jordens yta. Om sannolikheten för nedfall, P , är likformigt fördelad över jorden skulle ett objekt av 1000 slå ner i Sverige, dvs $P=0,001$. I verkligheten är sannolikheten för nedfall per enhet jordyta större på högre latituder för satelliter som går i en polär bana eller banor med stor inklinations. Detta beror på att jorden roterar vinkelrätt mot satellitbanan (för exakt polära banor) och att jordens omkrets vinkelrätt mot satellitbanan helt enkelt är mindre på höga latituder än vid ekvatorn. För att möta detta sätts sannolikheten för nedfall över Sverige då objektet går i en polär bana till $P_{SE}=0,002$.

Antagande 2 – Banorna ses som "skal" kring jorden. I verkligheten är en satellitbana en väldefinierad linje som bara passerar vissa punkter på jorden. Hur ofta den återkommer till precis samma punkt över jorden beror på sådant som banans höjd, inklinations, excentricitet etc. I detta arbete tittar vi på banor som degraderas över lång tid. Det innebär att banparametrarna ändras över tiden och att det inte går att definiera dem som en specifik bana under hela tidsförloppet. I stället ses de som ett "skal" inom den inklinations som den ursprungliga satellitbanan hade.

Antagande 3 – 39 föremål kan falla ner över Sverige. Det finns 42 större föremål med rester av radioaktivitet i omloppsbanan. Av dessa passerar tre (TRANSIT 4B, LES-8 och LES-9) aldrig över Sverige. Alltså kan banorna för 39 objekt degraderas på ett sådant sätt att de kan slå ner i Sverige.

Antagande 4 – Längsta livstid är 3 000 år. Samtliga objekt som passerar Sverige ligger i banor kring 1 000 km höjd. Den teoretiskt längsta livstiden för dessa antas vara i storleksordningen 3 000 år, d.v.s. inom 3 000 år har de alla degraderats så mycket att objekten har återinträtt och slagit ner på jordytan.

Antagande 5 - Endast ett nedslag möjligt inom 100 år. Endast en satellit, TRIAD OI-1X, har en teoretisk möjlighet att nå jordytan inom 100 år. Detta bygger på den stora osäkerhet i banans livslängd man får då den uppskattas enbart ur öppna, enkelt tillgängliga data. Den mest sannolika livslängden för banan är dock flera hundra år.

7.1 Satellit i bana återinträder och slår ner i Sverige

Med 42 föremål i bana som garanterat kommer att slå ner någon gång, och en sannolikhet $P_{SE\bar{A}}=0,002$ att det sker i Sverige så kommer Sverige att träffas av 0,07 radioaktiva objekt, dvs sannolikheten för nedslag i Sverige inom 3 000 år är 7 %, givet att inga fler NPS:er skjuts upp. Sannolikheten för nedslag inom 100 år ges av sannolikheten för nedslag i Sverige ($P_{SE\bar{A}}=0,002$) för det enda objektet som kan tänkas slå ner inom 100 år, gånger sannolikheten för att det verkligen sker inom 100 års tid. Den senare sannolikheten är i princip omöjlig att kvantifiera utan detaljerade kunskaper om objektet och dess bana. Med en variation mellan 1/1000 och 1/10 fås en

sammanlagd sannolikhet för nedslag i Sverige inom 100 år på mellan $P_{SE\hat{A}100}=2*10^{-4}$ – $P_{SE\hat{A}100}=2*10^{-6}$, d.v.s. mycket liten sannolikhet.⁴⁷

7.2 Uppskjutning misslyckas och nedslag sker i Sverige

Det finns en risk för att en uppskjutning av en satellit eller rymdsond med nukleärt material misslyckas och att detta material då faller ner över Sverige. Givet att dessa olyckor är jämt fördelade över tiden och jordytan har vi en sannolikhet $P_{SEU}=0,001$ att en misslyckad uppskjutning leder till ett nedslag i Sverige. Eftersom detta inte rör sig om satelliter som gått många varv runt jorden i en polär bana är inte höga latituder överrepresenterade i denna sannolikhetskalkyl och sannolikheten för nedslag i Sverige blir 0,001 och inte 0,002 som i fallet med satelliter i bana ovan.

Vi antar att det sker ungefär en uppskjutning av en rymdsond med NPS vart fjärde år under de kommande 100 åren, d.v.s. 25 uppskjutningar och att 10% av dem leder till haveri.⁴⁸ Detta skulle innebära 2,5 misslyckade uppskjutningar under 100 år, och därmed $P_{SEU100}=0,0025$ (eller $P_{SEU100}=2,5*10^{-3}$), d.v.s. en sannolikhet på 0,25% att Sverige drabbas av ett radioaktivt nedfall på grund av en misslyckad uppskjutning av en rymdsond med NPS ombord inom 100 år.

⁴⁷ För att skilja de olika sannolikheterna åt används följande notation: SE för ”över Sverige”, Å för ”vid återinträde”, U för ”vid uppskjutning” och 100 för ”inom 100 år”.

⁴⁸ Totalt för 1957-1999 har 8,9 % av alla uppskjutningar lett till haveri. Eftersom vissa bärraketer har haft flera satelliter ombord är siffran för satelliter som förlorats vid misslyckade uppskjutningar annorlunda än antalet uppskjutningar i sig. Se till exempel *Space Launch Vehicle Reliability*, Crosslink-The Aerospace Corporation Magazine of Advances in Aerospace technology, vintern 2001, tillgänglig via www.aero.org/publications/crosslink/winter2001/03.html, kontrollerad 2008-07-28.

8 Avslutande observationer

Kärnenergi har nyttjats i rymden nästan lika länge som rymden har nyttjats. En tydlig trend är dock den som också slås fast i FN:s principer för nukleära kraftkällor att NPS inte nyttjas då det inte är helt nödvändigt. Härvid har teknikutvecklingen sannolikt bidragit på ett positivt sätt. Ett exempel är den funktionalitet som US-A/RORSAT erbjöd Sovjetunionen i slutet på sextiotalet. Det är rimligt att anta att det amerikanska Lacrosse-satelliterna från slutet av 1980-talet erbjuder samma eller bättre förmåga än US-A/RORSAT men utan NPS. Det är därför troligt att vi inte kommer att få se någon ny klass av satelliter i låga banor med NPS. Därmed skulle inte heller risken för nedslag av en satellit i bana öka avsevärt inom en överskådlig framtid.

Teknikutvecklingen bidrar dock i andra riktningen när det gäller risker vid uppskjutningen. Förmågan att bygga autonoma system ökar med IT-utvecklingen och fler länder har engagerat sig i att utforska rymden. Därmed kan vi förväntas oss fler interplanetära sonder uppskjutna i allt snabbare takt inom de kommande hundra åren, och därmed en ökad sannolikhet för att ett eller flera haverier i samband med uppskjutning av NPS skall inträffa inom en begränsad tid.

Det är i detta sammanhang värt att notera att ingen NPS någonsin har varit orsak till ett haveri. Det finns därför ingen anledning att anta att uppskjutningar av system med NPS skulle ha en större sannolikhet för haveri än andra rymdsystem.

Erfarenheterna från Nimbus B-1 (1968) är att ett haveri vid uppskjutning inte behöver betyda utsläpp av radioaktivitet (R). De två RTG:erna på Nimbus B-1 kunde bärgas intakta och bränslet kunde återanvändas. Ett haveri vid uppskjutning av en RTG behöver inte innebära R-kontaminering och risken för R-kontaminering kommer att bero mer på designen av RTG:en än på uppskjutningen i sig.

För system som nått omloppsbana är det avgörande huruvida de brinner upp vid återinträdet i atmosfären eller inte. Om en RTG brinner upp i atmosfären kommer det radioaktiva materialet spridas där och bidra till att höja mängden radioaktivitet i atmosfären. Det är förvisso inte eftersträvänsvärt men innebär ingen omedelbar risk för nedslag på någon specifik plats på jorden. Dock är det inte en filosofi som bör utnyttjas eftersom den ökar den kollektiva dosintekningen.

För svenskt vidkommande är sannolikheten för att något som nu finns i bana slår ner i landet inom hundra år synnerligen liten. Sannolikheten för att en uppskjutning av en rymdsond med NPS ombord misslyckas är minst en storleksordning större, sannolikt flera storleksordningar. Det är därför rimligt att fokusera på metoder och rutiner för riskbedömningar i samband med framtida uppskjutningar. Sådana bedömningar bör ta hänsyn till bland annat:

- Plats för uppskjutningen
- Var och när olika raketsteg skall tändas
- Konstruktion av NPS

Detta skulle kunna förberedas genom att lämpliga kontakter tas mellan berörda myndigheter inom ramen för krishanteringssystemet. I och med att den som skall skjuta upp en eller flera NPS:er enligt FN:s principer skall offentliggöra en säkerhetsbedömning bör ett underlag för en nationell svensk analys finnas tillgängligt.

9 Litteraturförteckning

9.1 Böcker

United Nations Treaties and Principles on Outer Space, United Nations, New York 1999

Harvey, Brian, *The Rebirth of the Russian Space Program*, Springer Praxis Publishing, Chichester, 2007

Wertz, James R, Larson, Wiley J., *Space Mission Design and Analysis 3rd ed.*, Kluwer Academic Publishers, 1999

D.M. Rowe, *Thermoelectrics Handbook*, CRC/Taylor & Francis, 2006.

A.K. Hyder, R.L. Wiley, G. Halpert, D.J. Flood and S. Sabripour, *Spacecraft Power Technologies*, Imperial College Press, 2000

9.2 Artiklar

Aftergood, Steven, *Background on Space Nuclear Power*, Science and Global Security, Vol 1, 1989

Bennett, Gary L., *Space Nuclear Power: Opening the Final Frontier*, AIAA, 2006

Bennett, Gary L., Hemler R. J., Shock, A., *Space Nuclear Power – An Overview*, Journal of Propulsion and Power, Vol 12, No 5, September-October 1996.

Chmielewski, Arthur B., Borshchevsky, Alexander, Lange, Robert, Cook, Beverly, *A Survey of Current Russian RTG Capabilities*, Jet Propulsion Laboratory, Monterey, CA, 1994

Johnson, Nicholas L, *Nuclear Power Supplies in Orbit*, Space Policy, augusti 1986.

Primack, Joel R, et al, *Space Reactor Arms Control*, Science and Global Security, Vol 1, 1989

Reese, R. Townsend, Vick, Charles P., *Soviet Nuclear Powered satellites*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 36, 1983

9.3 Internet

9.3.1 Websidor

Center for defense Information, www.cdi.org

European Space Agency, www.esa.int

Federation of American scientists, www.fas.org

Russian Space Research Institute (Институт Космических Исследований), www.iki.rssi.ru

Russian Space Web, www.russianspaceweb.com

United Nations Office for Outer Space Affairs, www.unoosa.int

Encyclopedia Astronautica, www.astronautix.com

Regina Hagen, *Nuclear Powered Space Missions - Past and Future*,
www.space4peace.org/ianus/npsmindex.htm (1998)

9.3.2 Webartiklar

China prepares to send a probe to the moon,
<http://www.spacetoday.org/China/ChinaMoonflight.html>, kontrollerad 2008-07-01.

Much ado about Cassini's Plutonium, CNN Sci-Tech Story Page, 1997-10-10,
tillgänglig via www.cnn.com/tech/9710/10/cassini.advancer/, kontrollerad 2008-07-01.

What really happened with Mars-96?, Federation of American Scientists, 1996-11-19,
www.fas.org/spp/eprint/mars96lo.htm, kontrollerad 2008-07-01.

Bilaga 1 - Halveringstider

Denna rapport handlar i första hand om rymdsystem och inte om kärnteknik. Dock spelar olika radionuklider huvudrollerna när det gäller bedömningen av hur allvarlig en olycka kan vara. En nuklid med kort halveringstid strålar mycket, men strålningen avtar snabbt.

För att ge en indikation på detta presenteras här halveringstiderna för de i rapporten omnämnda radionukliderna.

^{90}Sr	28.9 år
^{144}Ce	285 dygn
^{210}Po	138 dygn
^{235}U	704 miljoner år
^{238}U	4,47 miljarder år
^{238}Pu	87.7 år
^{239}Pu	24 100 år
^{242}Cm	163 dygn

Bilaga 2 - Satellitbanor

En satellit placeras i omloppsbanan genom att skjutas upp till önskad höjd och sedan ges en hög fart i banans riktning. Satelliten kommer sedan att falla av tyngdkraften mot jorden medan farten framåt gör att satelliten går in i omloppsbanan runt jorden istället för att träffa jordytan. Detta innebär bland annat att det för varje höjd finns precis en fart som ger en stabil bana. Saktar satelliten ner kommer den att närma sig jorden för att till slut störta och brinna upp i atmosfären.

En satellitbana är alltid elliptisk (cirkeln är ett specialfall av en ellips). Lägsta höjden (perigeum) och högsta höjden (apogeum) beskriver hur nära respektive hur långt bort satelliten kan vara från jorden sett. Formen på ellipsen beskrivs av dess eccentricitet.

Satellitbanan ligger alltid på ett plan som passerar genom jordens tyngdpunkt. Detta plan skär ekvatorn i en väl definierad vinkel. Denna vinkel kallas satellitens inklinationsvinkel och beskriver också hur långt norr/söder över jordytan som satelliten når. En inklinationsvinkel på 90° innebär att satelliten passerar över polerna, 0° att banan går längs med ekvatorn.

LEO – Low Earth Orbit

Låga banor innebär banor från ca 160 km höjd upp till ca 1000 km höjd. Den undre gränsen sätts av att atmosfären längre ner bromsar satelliten så mycket att det inte går att hålla en stabil bana. Den övre gränsen sätts av van Allens strålningsbälten.

LEO-banor kan i princip ha vilken inklinationsvinkel som helst. En typisk omloppstid för en satellit i LEO är 90-100 minuter. Dessa banor används typiskt för spanings satelliter.

MEO – Medium Earth Orbit

Medelhöga banor som ligger någonstans emellan LEO (se ovan) och GEO (se nedan). De viktigaste MEO är antagligen NAVSTAR/GPS-banorna på ca 20 200 km höjd. Det europeiska navigeringssystemet Galileos satelliter planeras ligga på ungefär samma höjd. Dessa banor har valts därför att satelliter på denna höjd är "semisynkrona", dvs går ett varv runt jorden på tolv timmar, eller annorlunda uttryckt: Två varv på ett dygn.

GEO – Geostationary Earth Orbit

Den geostationära banan är en speciell bana placerad längs med ekvatorn som har egenskapen att satelliterna rör sig lika fort som jorden roterar. Detta innebär att satelliter i GEO upplevs stå stilla relativt jorden. Avståndet till den geostationära banan är 35 800 km och positionen för en satellit i den geostationära banan anges relaterat till jordens longitud.