

Överföring av radiocesium till potatis vid olika nedfallstidpunkter

Transfer of radiocaesium to potatoes
at different times of fallout

Marielle Stenmark

Handledare: Klas Rosén och Jan Eriksson
Examinator: S. Ingvar Nilsson

EXAMENSARBETE I BIOLOGI, 30 HP, D-nivå

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för markkemi och jordmånslära
Examens- och seminariearbeten Nr 88

Uppsala 2008

ISSN 1102-1381
ISRN SLU-MLE-EXE--88--SE

Sammanfattning

Vid utsläpp av radioaktiva ämnen förorenas jordbruksmark. För att veta om grödorna sedan kan nyttjas som livsmedel måste vi veta hur stora halterna blir. I detta försök studerades uppfångning av ^{134}Cs vid direktdeponering på potatisblast och överföring vidare till knölarna. Experimentet utfördes under tre på varandra följande år. Plantorna odlades i försökskärl under fältnässiga förhållanden och den artificiella depositionen sprayades direkt på blasten vid olika tidpunkter under odlingssäsongen. Resultaten visar att tidpunkten för nedfall och grödans utvecklingsstadium styr ^{134}Cs -halten i den skördemogna potatisen. Som högst blev halten vid ett nedfall i mitten av odlingssäsongen. Förändringen över säsongen i ^{134}Cs -halt blir vid tidiga nedfall lägre med tiden. Vid sena nedfall tenderade halten däremot att öka med tiden vilket beror av att plantan har en aktiv näringstransport vid senare utvecklingsstadier. Vid en nedfallsnivå på 10 kBq ligger halten i den skördemogna potatisen över gränsvärdet om nedfallet sker i mitten av säsongen. Åtgärder för att komma under gränsvärdet kan vara att kaliumgödsla, tidigarelägga skörden eller kapa av blasten.

Nyckelord: Potatisknöl, potatisblast, ^{134}Cs , artificiell deposition, radioaktivitet

Abstract

Agricultural land could be polluted by radioactive substances after a fallout. We would then need information about the level of contamination to decide whether the crops could be utilized as food under these circumstances. In an experiment carried out during the 1990ies the retention of ^{134}Cs in potato haulm and the transfer to the tubers were studied. The experiment was carried out during three consecutive years. The plants were cultivated in pots under field conditions and the artificial deposition was sprayed directly onto the potato haulm at different times during the growing season. The results showed that the time of fallout and the developmental stage of the crop controlled the ^{134}Cs content in the harvest-mature potato tubers. The highest content was detected in the case of a fallout in the middle of the growing season. In the case of an early fallout, the change in ^{134}Cs content during the growing season decreased with time. After a late fallout the content tended to increase with time which was supposedly due to an active transport during the later stages of crop development. Assuming a fallout corresponding to 10 kBq the ^{134}Cs content in the harvest-mature potato tubers would be above the permitted threshold value after a radioactive fallout taking place in the middle of the growing season. Actions to decrease the Cs content below the threshold value may include potassium fertilisation, an early harvest or cutting of the potato haulm.

Key words: Potato tuber, potato haulm, ^{134}Cs , artificial deposition, radioactivity

Innehållsförteckning

1. Inledning	7
2. Bakgrund	8
2.1 Joniserande strålning.....	8
2.1.1 Partikelstrålning	8
2.1.2 Elektromagnetisk strålning	8
2.2 Strålningens effekt på människan	8
2.3 Halveringstider.....	9
2.3.1 Fysikalisk halveringstid	9
2.3.2 Biologisk halveringstid	9
2.3.3 Effektiv halveringstid.....	9
2.3.4 Ekologisk halveringstid	10
2.4 Vår strålmiljö	10
2.4.1 Antropogena radionuklider i miljön.....	11
2.4.2 Situationen i Sverige	11
2.4.3 Nedfallets sammansättning	12
2.5 Överföring av radionuklider	12
2.5.1 Extern och intern strålning.....	12
2.5.2 Gränsvärden för livsmedel.....	12
2.5.3 Överföring via livsmedelskedjor.....	13
2.6 Faktorer som påverkar överföring av radionuklider	13
2.6.1 Torr- och våtdeposition.....	13
2.6.2 Uppfångning och kvarhållning	14
2.6.3 Upptag i rötter	14
2.7 Motåtgärder inom jordbruket.....	14
2.8 Potatis.....	15
2.8.1 Potatisens utvecklingsstadier	15
2.8.2 Translokering till potatisknölnarna	16
2.8.3 Upptag av kalium och cesium.....	17
2.8.4 Radiocesiumhalter i förädlad potatis	17
2.8.5 Forskningsresultat kring överföring av cesium till gröda	18
3. Material och metoder	19
3.1 Försöksplan	19
3.2 Utförande	20
3.2.1 Sättning och deposition.....	20
3.2.2 Skörd och preparering av proverna.....	22
3.2.3 Mätning av aktivitet.....	23
3.3 Temperatur och nederbörd under försöksperioden	23

3.4 Beräkningar.....	24
4. Resultat & diskussion	26
4.1 Halt av ¹³⁴ Cs i skördemogen potatis efter olika nedfallstidpunkter	26
4.1.1 År 1990	26
4.1.2 År 1991	27
4.1.3 År 1992	29
4.1.4 Jämförelse mellan de tre åren	29
4.2 Förändringar av ¹³⁴ Cs-halt i potatisplantan under säsongen	30
4.2.1 År 1990	30
4.2.2 År 1991	31
4.2.3 År 1992	32
4.2.4 Jämförelse mellan de tre åren	33
4.3 Olika nedfallsscenarier och handlingsstrategier för att motverka höga halter	33
4.3.1 Motåtgärder.....	35
4.4 Felkällor	36
5. Sammanfattande diskussion	37
6. Referenser	38

1. Inledning

Enligt regeringsbeslut ska god beredskap finnas mot kärnenergiolyckor. Vid nedfall av radioaktiva ämnen över jordbruksmark är det viktigt att minska överföring till grödor, djur och livsmedel. Beroende på tidpunkten och storleken på nedfallet kan olika motåtgärder bli aktuella för att minska överföringen till våra livsmedel.

För de flesta av våra jordbruksgrödor finns gott om underlag för att skatta överföring av radioaktiva ämnen. För potatis däremot finns en stor kunskapslucka kring nedfall i växande potatisbestånd. De underlag som finns i nuläget handlar om hur radiocesium överförs från jord till potatisknöl. Utifrån dessa resultat har motåtgärder tagits fram som gäller vid nedfall under vinterhalvåret eller tidig vår innan grödan hunnit komma upp. Detta examensarbete syftar till att undersöka hur direktdeponering på potatisblast överförs till knölen och på så sätt komplettera med motåtgärder som är relevanta under odlingssäsongen.

I detta examensarbete sammanställs och utvärderas mätdata från försök som utförts under tre på varandra följande år där potatisblast experimentellt har kontaminerats med en radioaktiv isotop av cesium vid olika tidpunkter under odlingssäsongen. Syftet är att studera hur överföring av radiocesium till potatis vid direktdeponering på blast beror av tidpunkten för nedfallet och grödans utvecklingsstadium. Resultaten ska sedan ligga till grund för att ta fram motåtgärder för att minimera och motverka negativa effekter på potatis i Sverige vid ett eventuellt radioaktivt nedfall.

2. Bakgrund

2.1 Joniserande strålning

Vi kan inte upptäcka joniserande strålning med något av våra sinnesorgan och den skiljer sig därför från både vanligt ljus som syns och värmestrålning som känns. Avgivande av joniserande strålning är en spontan process och sker när en radioaktiv isotop sönderfaller från ett tillstånd med en viss kärnenergi till ett tillstånd med lägre kärnenergi. Överskottsenergin utsänds genom *joniserande strålning*. Termen kommer av att energirika partiklar har förmåga att jonisera molekyler (materia) som kommer i deras väg eller närhet. Med jonisering menas att partikeln sliter loss elektroner i den exponerade materian. Aktiviteten mäts i becquerel (Bq) där en Bq motsvarar ett sönderfall per sekund. De vanligaste typerna av joniserande strålning är alfastrålning och betastrålning som är partikelstrålning, samt gammastrålning och röntgenstrålning som är elektromagnetisk strålning. (Andersson *et al.*, 2007; Johansson, 1996) Radioaktivt cesium avger både beta- och gammastrålning (FOI, 2002).

2.1.1 Partikelstrålning

Alfastrålning når några centimeter i luften och stoppas av tunna skikt av fast material, såsom ett pappersark eller ett cellskikt i människans överhud. Om alfastrålningen däremot kommer in i människokroppen genom exempelvis livsmedel eller inandning så kan den göra stora skador på intilliggande celler och organ. Radon och plutonium är exempel på radioaktiva ämnen med alfasonderfall.

Betastrålning når några tiotal meter i luft och någon centimeter i levande vävnad. Strålningen stoppas av en fönsterruta eller grova kläder. Exempel på radioaktiva ämnen som avger betastrålning är jod, cesium samt strontium.

2.1.2 Elektromagnetisk strålning

Gammastrålning är av samma stråltyp som vanligt ljus fast med mycket högre energi. Den har en lång räckvidd och genomträngningsförmåga vilket gör att den kan nå in i kroppen på mycket långa avstånd. För att stoppa denna strålning måste man använda sig av tjocka skikt av tunga material, såsom bly och betong. Ett skikt på 50-100 cm vatten stoppar merparten av gammastrålningen.

Röntgenstrålning är av samma strålningstyp som gammastrålning men oftast med lägre energi. Den största skillnaden mellan dem är deras ursprung. Röntgenstrålning skapas ofta på konstgjord väg i röntgenrör med hjälp av elektricitet, och uppstår från energiövergångar mellan elektronskalen i atomen. Gammastrålningen däremot uppkommer när radioaktiva kärnor sönderfaller. (Andersson *et al.*, 2007; FOI, 2002)

2.2 Strålningens effekt på människan

Den joniserande strålningen slår sönder atomer och molekyler vilket leder till att strålningen kan skada celler och DNA-molekyler. Ofta kan cellerna reparera sig själva men strålning kan trots detta leda till ökad risk för cancer senare i livet. De celler som är mest sårbara för joniserande strålning är de celler som delar sig kontinuerligt. Dessa celler finns i benmärg,

tarmkanalen och testiklar. De är speciellt vanliga under fosterutvecklingen. Om en människa utsätts för höga stråldoser kan hon få akut strålsjuka. De symptom som uppkommer vid exponering av joniserande strålning är illamående (inklusive kräkningar), matthet och diarré. De radioaktiva ämnena ackumuleras på olika ställen i kroppen. Exempelvis ansamlas jod i sköldkörteln, strontium i skelettet och cesium huvudsakligen i muskel- och mjukvävnad. (FOI, 2002; Johansson, 1996)

2.3 Halveringstider

2.3.1 Fysikalisk halveringstid

Den *fysikaliska halveringstiden* ($T_{1/2, \text{fys}}$) är den tid det tar för ett antal instabila kärnor att sönderfalla så att hälften av dem finns kvar. Halveringstiden är alltså inte i sig ett mått på hur farligt ett ämne är, bara hur snabbt strålningen från ämnet minskar. Tabell 1 nedan visar olika ämnens fysikaliska halveringstid. Två nuklider av samma ämne kan ha vitt skilda halveringstider. ^{134}Cs har exempelvis två års fysikalisk halveringstid medan en annan isotop ^{137}Cs har 30,6 års fysikalisk halveringstid. (FOI, 2002)

Tabell 1. Halveringstid för olika ämnen.

Ämne	Z	Fysikalisk halveringstid ($T_{1/2, \text{fys}}$)
Radon	222	3,8 dygn
Jod	131	8 dygn
Kobolt	60	5 år
Strontium	90	29 år
Strontium	89	51 dygn
Cesium	137	30 år
Cesium	134	2 år
Kol	14	5 700 år
Plutonium	239	24 000 år
Kalium	40	1,3 miljarder år
Uran	238	4,5 miljarder år

2.3.2 Biologisk halveringstid

Den *biologiska halveringstiden* ($T_{1/2, \text{bio}}$) anger den tid det tar för ett ämne att minska till hälften i kroppen eller i ett enskilt organ genom biologiska processer. För cesiumisotoperna 134 och 137 är den biologiska halveringstiden för människan ca 90 dygn. För jod är motsvarande siffra ca 140 dygn (FOI, 2002).

2.3.3 Effektiv halveringstid

Då ett radioaktivt ämne hamnar i kroppen minskar halten med både den fysikaliska och den biologiska halveringstiden. Det sammanvägda uttrycket för dessa två termer kallas för *effektiv halveringstid* ($T_{1/2, \text{effektiv}}$).

$$1/T_{1/2, \text{effektiv}} = 1/T_{1/2, \text{bio}} + 1/T_{1/2, \text{fys}}$$

Den effektiva halveringstiden är alltid mindre än den kortaste av de två halveringstiderna. Detta betyder alltså att om ett ämne som kommit in i ett djur har en lång fysikalisk

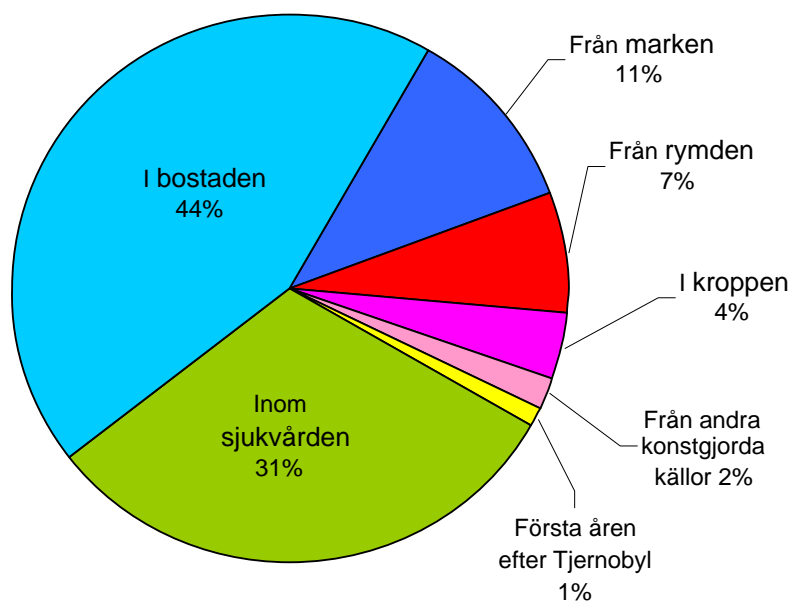
halveringstid så kan en kort biologisk halveringstid avsevärt minska djurets innehåll av det radioaktiva ämnet.

2.3.4 Ekologisk halveringstid

Då den radioaktiva föroreningen hamnar i naturen påverkas den av hur olika ämnen omlagras i naturen samt av hur de transporteras i näringskedjorna. Detta kallas för den *ekologiska halveringstiden* och är den tid det tar för ett ämne att minska till hälften under inverkan av ekologiska processer. Exempelvis kan ämnena bindas till markpartiklar samt tas upp av växter och djur, vilket med tiden minskar de radioaktiva ämnenas koncentration.

2.4 Vår strålmiljö

Årligen utsätts varje person i Sverige för en medelstråldos på ca 4,5 mSv (figur 1). Radon i bostäder utgör nära hälften av den stråldosen och näst största källan är strålning från behandlingar och undersökningar inom sjukvården såsom röntgenundersökningar, datortomografi och isotopundersökningar. Den naturliga bakgrundsstrålningen uppgår till 1 mSv per år och har tre olika ursprung: terrester strålning från ämnen som naturligt förekommer i vår berggrund, kosmisk strålning från solen och yttre rymden samt radioaktivt ⁴⁰kalium som finns naturligt i kroppen. (Rosén & Haak, 2006)



Figur 1. Vår strålmiljö och dess utsprung. Bild modifierad från Andersson (2007).

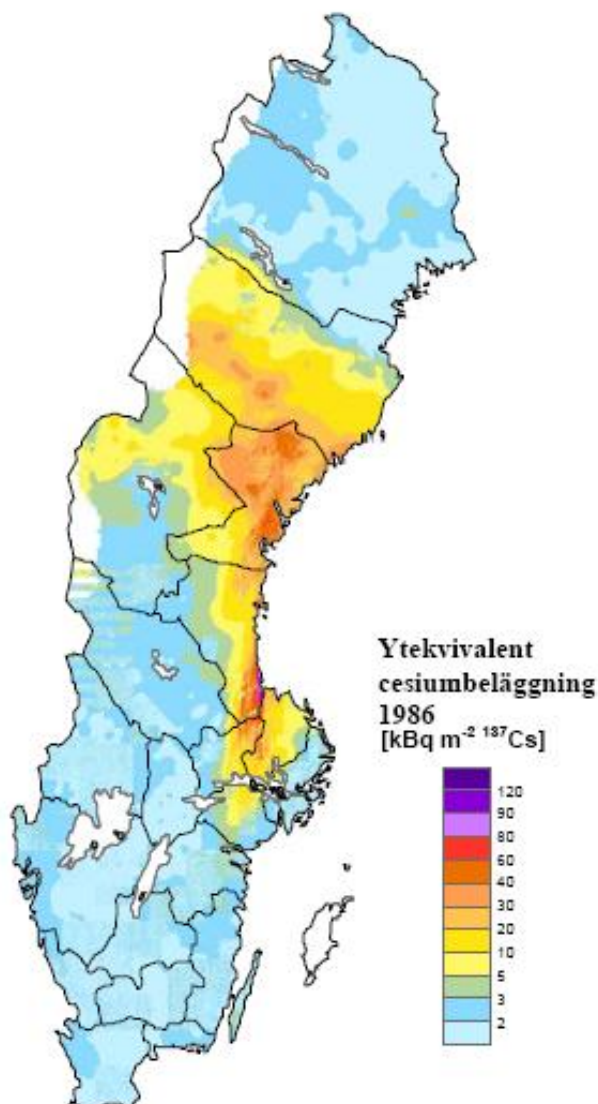
Vissa grupper får högre doser än genomsnittet exempelvis rökare, f.d. rökare, renskötare, frekventa flygresenärer och de med dricksvattenproblem från egna borrade brunnar samt de som bor i radonhus. Personer som arbetar på kärnkraftverk i Sverige får i genomsnitt en extra stråldos på ca. 3 mSv per år. (Andersson *et al.*, 2007) Den årliga dos som kärnkraften får tillföra allmänheten är 0,1 mSv per år. För människor sysselsatta i verksamheter som innefattar strålning får stråldosen vara max 50 mSv under ett år eller högst 100 mSv under en femårsperiod. (Rosén & Haak, 2006)

2.4.1 Antropogena radionuklider i miljön

Vi människor kan bidra till att radionuklider sprids i naturen genom exempelvis transporter av radioaktiva ämnen, kärnenergiolyckor, flygplan med atombomber, satelliter, strålning inom sjukvård, forskning, atomubåtar samt i samband med terrorism i så kallade ”Dirty bombs” (Andersson *et al.*, 2007; FOI, 2002).

2.4.2 Situationen i Sverige

Sverige har tre kärnkraftverk med sammanlagt 10 reaktorer. Kärnkraftverken ligger i Ringhals, Oskarshamn och Forsmark och tillsammans står de för ungefär 50 % av Sveriges elproduktion (SKI, 2007). Östeuropa och forna Sovjetunionen har stort behov av elenergi via kärnkraft men på grund av ländernas dåliga ekonomiska läge finns inte pengar för att hålla västerländsk standard på säkerheten kring anläggningarna. Därför får dessa länder stöd från omvärlden. Skulle ett haveri ske i något av de utländska kärnkraftverken så kommer vi i Sverige troligen inte få så höga strålnivåer att de ger akuta skador. Däremot kan vi få problem med våra livsmedel som kan komma att ta upp radioaktiva ämnen, främst jod och cesium eftersom de utgör det största marknedfallet vid en olycka. (FOI, 2002) Figur 2 visar Sveriges ytbeläggning av ^{137}Cs till följd av utsläppen från Tjernobylolyckan i april 1986.



Figur 2. Nedfallet av ^{137}Cs i Sverige efter Tjernobylolyckan 1986. Från SGU:s flygradiometriska databas © Sveriges geologiska undersökning (SGU). Medgivande: 30-1866/2007.

2.4.3 Nedfallets sammansättning

Efter ett radioaktivt nedfall i samband med en kärnkraftsolycka utgör olika ämnen problem under olika faser. Under de första dagarna är det kortlivade isotoper som utgör det största problemet, där ^{131}I (med halveringstid 8 dagar) är det viktigaste ämnet att beakta i livsmedelsproduktionen. Senare utgör cesiumisotoper det största problemet, främst ^{134}Cs (halveringstid 2,06 år) och ^{137}Cs (30,0 år). Efter ca ett år är det vanligen ^{137}Cs som dominerar. Andra radioaktiva isotoper kan också spela en stor roll som exempelvis strontium, isotop ^{90}Sr och ^{89}Sr . (FOI, 2002)

2.5 Överföring av radionuklider

2.5.1 Extern och intern strålning

Det finns två vägar för den joniserande strålningen att nå människan. Befinner sig strålkällan utanför kroppen, exempelvis på marken, talar man om *extern bestrålning*. Här är gammastrålningen den mest skadliga typen på grund av sin långa räckvidd i förhållande till alfa- och betastrålning. (Rosén & Haak, 2006; FOI, 2002)

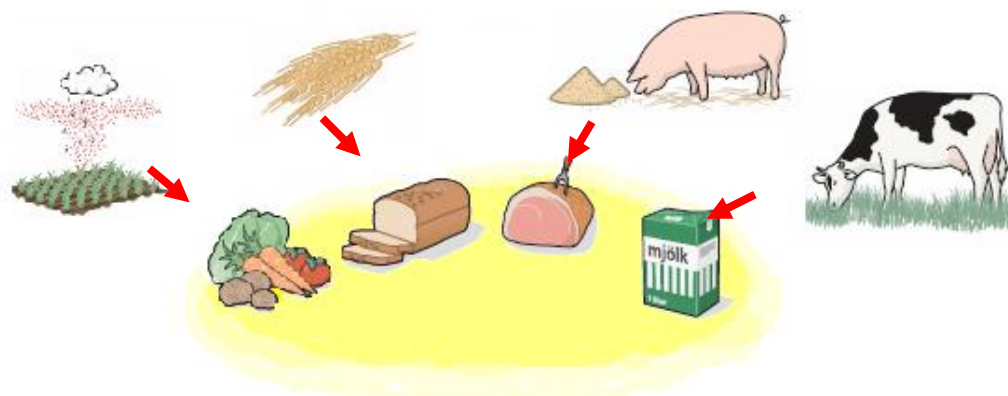
Den andra vägen för radioaktiva ämnen till människan är genom *intern bestrålning* och innebär att strålkällan kommer in i kroppen antingen genom luften som vi inandas eller genom livsmedel som vi äter. Strålkällan har då tagit sig igenom kroppens naturliga barriärer såsom kläder och hud och kommit in i ett system som är avsett till att ta upp ämnen istället för att skydda mot dessa. Vid intern strålning är *det* alfa- och betastrålning som ger de största skadorna. Strålningens korta räckvidd gör att vävnaderna som ligger intill påverkas (FOI, 2002). Om livsmedel från kontaminerade områden kommer ut i handeln så når de konsumentledet relativt snabbt vilket leder till internstrålning av människor utanför dessa områden (Rosén & Haak, 2006). Därför är det viktigt att snabbt vidta motåtgärder och genomföra kontroller av livsmedel för att hindra att de radioaktiva ämnena sprids denna väg.

2.5.2 Gränsvärden för livsmedel

För att hålla nere stråldosen av radioaktiva ämnen till människor har gränsvärden satts för livsmedel. Intaget av radioaktiva ämnen ska minimeras så långt det är möjligt med hänsyn till ekonomiska och sociala faktorer (FOI, 2002). Efter Tjernobylyckan har Statens strålskyddsinstitut bestämt att livsmedel inte får ge allmänheten en dos överstigande 1 mSv/år. Därför satte Livsmedelsverket 1986 gränsvärdet för livsmedel till 300 Bq/kg. Gränsvärdet höjdes dock året därpå för vissa livsmedel som insjöfisk, vilt (ren, rådjur, älg), svamp och bär till 1 500 Bq/kg. Dessa livsmedel innehåller oftast högre halter av cesium men konsumeras sällan i samma mängd. Därför kan en högre gräns tolereras (med vissa restriktioner för utsatta grupper som exempelvis jägare) utan att det årliga intaget av radiocesium överstigs. För våra baslivsmedel såsom potatis och mjölk gäller gränsvärdet 300 Bq/kg än idag. (Andersson *et al.*, 2007; Åhman, 2005)

2.5.3 Överföring via livsmedelskedjor

De radioaktiva ämnena kan överföras till oss människor genom olika livsmedelskedjor. Detta kallas för intern strålning. Överföringen kan exempelvis ske via grönsaker (grönsaker – människa), via bröd (säd – bröd – människa), via kött (foder – djur – kött – människa) samt via mjölk (foder – ko – mjölk – människa) (Rosén & Haak, 2006; FOI 2002).



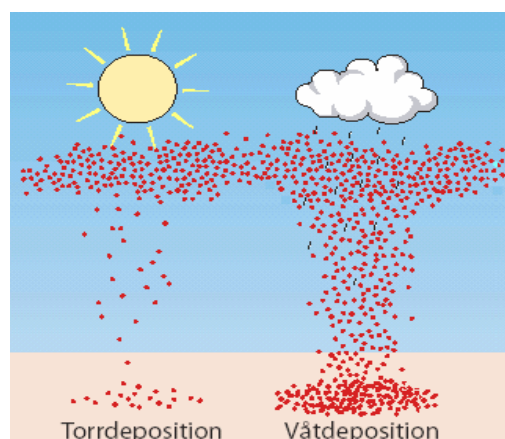
Figur 3. Överföring av radioaktiva ämnen till oss människor via olika livsmedelskedjor. Bilden är modifierad från FOI (2002).

2.6 Faktorer som påverkar överföring av radionuklider

Ett flertal faktorer påverkar hur omfattande överföringen av radiocesium till gröda blir vid ett nedfall. En betydande roll spelar nedfallets storlek och sammansättning samt spridningen inom området. Även under vilken årstid som nedfallet sker påverkar föroreningsgraden. Stora skillnader finns beroende på om nedfallet sker under växtsäsongen eller under grödans viloperiod. En annan avgörande faktor för växtens nuklidhalt och totala nuklidinnehåll är hur lång tid innan skörd som nedfallet sker.

2.6.1 Torr- och våtdeposition

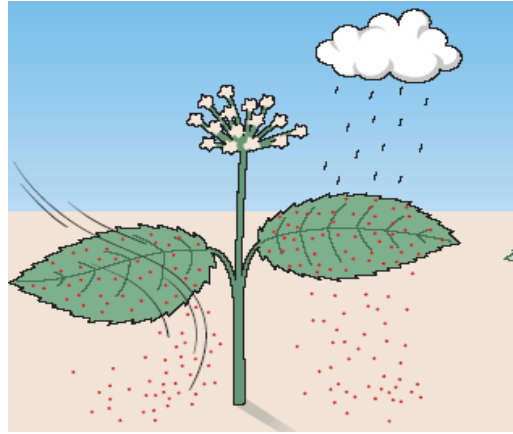
Om en luftmassa innehållande radioaktiva ämnen kommer in över ett område i samband med vackert väder kan stora delar av det radioaktiva molnet dra förbi vilket leder till att färre nuklider deponeras över området. Denna deponering kallas för torrdeposition. Vid våtdeposition i samband med nederbörd blir depositionen betydligt högre och ju mer nederbörd som faller desto högre blir markbeläggningen (se figur 4). I vissa fall kan även torrdeposition bli mycket hög, exempelvis om den radioaktiva luftmassan sveper över en tätbevuxen yta så att stora delar av depositionen fångas upp av vegetationen.



Figur 4. Nedfallet blir oftast högre vid våtdeposition än vid torrdeposition. Bilden är modifierad från FOI (2002).

2.6.2 Uppfångning och kvarhållning

Det är grödans egenskaper och det deponerade materialets sammansättning som avgör hur mycket av nedfallet som fångas upp av vegetationen och hur mycket som faller direkt ner på marken (figur 5). Olika grödor har olika uppfångningskapacitet och den kan variera mellan 10-90 % (FOI, 2002). En tid efter ett nedfall har delar av det uppfångade radioaktiva nedfallet transporterats till marken genom påverkan av vind och nederbörd och därmed minskar nuklidhalten i grödan. Nuklidhalten minskar ytterligare genom bladavfall samt genom utspädning på grund av grödans tillväxt.



Figur 5. Med tiden sker transport av radio-cesium till marken genom vind och nederbörd. Bilden är modifierad från FOI (2002).

2.6.3 Upptag i rötter

Överföringen av radionuklider till växten domineras det första året efter ett nedfall i växande gröda av biomassans uppfångning. Andra året efter nedfallet, och även efterföljande år är överföring från jorden via rötterna av största betydelsen. Med tiden omfördelas de radioaktiva ämnena från markytan till djupare skikt. Hur stort upptaget av radioaktiva ämnen i växtens rötter är beror på ett flertal faktorer. De viktigaste är markens näringsstatus, pH-värdet samt hur rötterna är fördelade i markprofilen. Även markens innehåll av ler- och humuspartiklar har stor betydelse.

Biologiska processer gör ingen skillnad på radioaktiva och stabila nuklider av ett grundämne och därför följer de samma väg genom växter och djur (Rosén & Haak, 2006). Cesium är kemiskt besläktat med kalium och ämnena tar i stort sett samma vägar i naturen. På liknande sätt följer strontium till stor del samma kretslopp som kalcium. (FOI, 2002; Nisbet & Shaw, 1994)

2.7 Motåtgärder inom jordbruket

Om radioaktiva ämnen väl har hamnat i naturen finns inget sätt för oss människor att oskadliggöra dem. Det enda sättet de kan oskadliggöras på är att de naturligt får sönderfalla till stabila ämnen. Det vi människor kan göra är att undvika att strålningen når oss, flytta på den om den redan nått oss samt skärma av den.

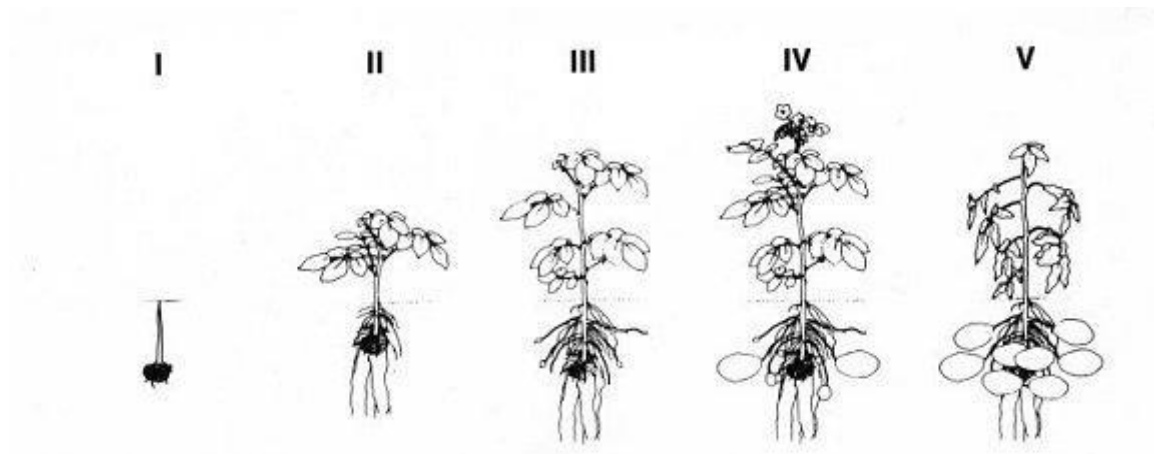
För alla ingrepp som görs i pågående växt- och djurproduktion gäller att kostnaden för insatta medel ska vägas mot den ekonomiska nyttan av dessa medel (nyttan ska överstiga kostnaden). Exempel på motåtgärder innan ett nedfall kan vara att ställa in betande djur, minska ventilationen i djurstallar och i lagringsutrymmen för säd och foder, tidigarelägga skörden samt täcka grödan. Efter ett nedfall kan aktuella åtgärder vara att föra bort den förorenade grödan eller det översta lagret av marken, kaliumgödsla, kalka, plöja, saneringsutfodra djur med rent foder samt senarelägga skörden eller ändra driftsriktning. (Rosén & Haak, 2006)

2.8 Potatis

Potatisen är världens fjärde vanligaste gröda efter vete, majs och ris. Den har den bäst balanserade sammansättningen vad gäller innehåll av kalorier och proteiner inklusive alla essentiella aminosyror. I Sverige äter vi 42 kg potatis per person och år (Axfood, 2007). Potatis delas in i matpotatis och stärkelsepotatis. Till matpotatis räknas all potatis för direktkonsumtion såsom färskpotatis och höst- och vinterpotatis. Hit räknas även potatis för tillverkning av mos, chips, pommes frites m.m. samt även foderpotatis och utsädesodlingar av matpotatis. Stärkelsepotatis odlas för stärkelseframställning och används i industrin för framställning av exempelvis råsprit (NE, 2007) och papper. (SJV, 2007)

2.8.1 Potatisens utvecklingsstadier

En viktig faktor för att kunna bedöma effekten av radionuklidens vidaretransport till livsmedel är vilket utvecklingsstadium som grödan befinner sig i vid nedfallstidpunkten (Rosén & Haak, 2006). Potatisplantans utveckling kan beskrivas med fem olika stadier, se figur 6 (Manitoba agriculture, 2007; Bodin & Svensson, 1996; Bodin, 1983).



Figur 6. Potatisens utveckling kan delas in i fem stadier: I. Groning, II. Stolontillväxt, III. Knölbildning, IV. Knöltillväxt samt V. Mognad. Bilden är modifierad från Manitoba agriculture (2007).

Utvecklingsstadium I kallas för *groning* och sträcker sig från det att sättknölen kommer i jorden fram till plantans uppkomst, ca 3-4 veckor efter sättningsen. Då potatisknölen hamnar i jorden utvecklas groddar som växer upp genom jorden och bildar huvudstjälkar. Groddarna utvecklar adventivrötter som tar över näringsförsörjningen till plantan. Därmed har sättknölen fullgjort sin uppgift, vilket brukar ske ca 40-50 dagar efter sättningsen.

Utvecklingsstadium II kallas för *stolonbildning* och här tillväxer blasten som mest under potatisens utveckling. Från huvudstjälkarna ovan jord växer sidostjälkar och blad ut från noder. Från stjälken under markytan växer underjordiska skott ut. Dessa kallas stolonerna. Stolonerna växer horisontellt, är ofta förgrenade och kan bli 10-200 mm långa.

Utvecklingsstadium III benämns *knölbildning* och sker ca 7 veckor efter sättningsen och varar fram till ca 3 månader då alla potatisknölar har bildats. Under detta stadium avbryts stolonens längdtillväxt och spetsen börjar svälla på grund av att celledelningshastigheten ökar. Så länge

knölen sitter fast i stolonen kommer den att påverkas av både moderplantan och den omgivande miljön (Bodin & Svensson, 1996).

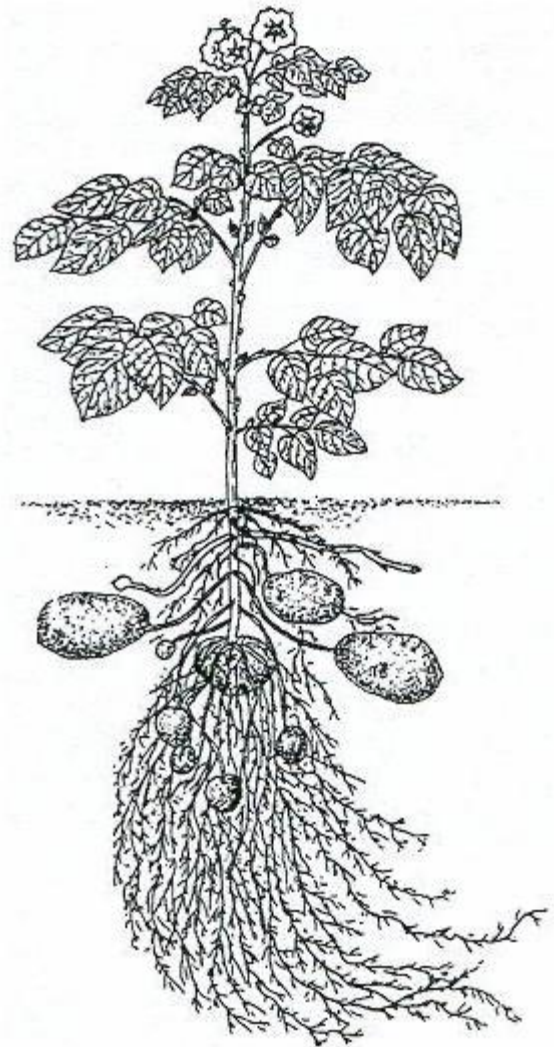
Utvecklingsstadium IV inträder efter att potatisknölarna nått sitt maxantal och kallas *knöltillväxt*. Här utvidgas knölarnas celler genom ansamling av vatten, näringsämnen och kolhydrater.

Utvecklingsstadium V kallas för *mognad* och här slutar plantan att växa. Under detta stadium mognar och tjocknar potatisens skal och blasten vissnar för att så småningom dö.

2.8.2 Translokering till potatisknölarna

I potatisblastens gröna blad bildas kolhydrater genom fotosyntesen. Därefter transporteras fotosyntesprodukterna främst i formen av sukros, vidare till regioner där de används eller lagras, nämligen i potatisens stamknölar (figur 7). Denna transport kallas för translokering och sker genom floemet som tillhör växtens ledningsvävnad (kärlsystem som är anpassade för transport av vätska). Det är skillnaden i vattenpotential som möjliggör att ämnena kan translokeras i plantan. Knölarnas tillväxthastighet beror alltså av fotosyntesen och hur mycket som tillförs den enskilda knölen. Fotosyntesaktiviteten skiljer sig inte nämnvärt mellan gamla och nya blad, däremot har yngre blad betydligt intensivare cellandning än de äldre. (Bodin & Svensson, 1996)

Knölbildningen (utvecklingsstadium III) är en av de viktigaste processerna i potatisens utveckling och sker när plantan når sitt minimum i torrsubstans. I samband med knölbildningen ökar nettoassimilationen starkt hos potatisplantan och ämnesflödena är mer aktiva. (Bodin & Svensson, 1996) När knölbildningen väl har startat går alla fotosyntesprodukter ner till potatisknölarna och bladtillväxten hämmas (Harris, 1978). De ämnen som finns i blasten translokeras ner till knölen. Miljön kring blast och potatisknöl påverkar balansen mellan knölarnas tillförda och omsatta mängd. Det finns stora variationer i de enskilda knölarnas tillväxt, vissa har en fortlöpande tillväxt medan andra växer i omgångar med viloperioder. (Bodin & Svensson, 1996)



Figur 7. Potatisplanta med stoloner och knölar, blast, rötter och sättnö (Fogelfors, 2001).

Potatisodling

Arealer

Arealen odlad potatis i Sverige 2006 var 28 200 ha vilket motsvarar 1 % av den totala åkerarealen. Av denna areal är cirka 20 200 ha matpotatis och drygt 8 000 ha stärkelsepotatis (Jordbruksstatistisk årsbok, 2007).

Avkastning

Avkastningen skiljer sig mycket mellan potatissorter (Fogelfors 2001). Enligt Jordbruksstatistisk årsbok (2007) är hektarskörden av matpotatis 26 ton. För färskpotatis ligger värdet på 12-18 ton/ha medan en bra höst- och vintersort kan ligga på 45 ton/ha. Fabrikspotatis kan ge hela 70 ton/ha i avkastning. En potatis har normalt en ts-halt på 22,5 % men kan variera mellan 13,1-36,8 (Fogelfors, 2001).

Jorden

Potatisen trivs bäst på lätta jordar som är stenfria, fast även torvjordar kan passa bra. Potatisen kan både trivas och ge hög avkastning på tyngre jordar men dessa jordar bildar lätt jordklumpar och anses då mindre lämpliga då knölen kan skadas och skörden försvåras. Potatisen kräver mycket näring och trivs bäst i jordar med pH 5-6. En jämn vattentillgång ger en bra potatisskörd både vad gäller kvalitet och kvantitet. (Fogelfors, 2001)

2.8.3 Upptag av kalium och cesium

Kalium är ett makronäringsämne och innehållet i både blast och potatisknölar är högre än för andra makronäringsämnena. Potatisplantan har ett stort behov av kalium från första början tills blasten har växt färdigt. En tid efter detta minskar upptaget av kalium snabbt. (Fogelfors, 2001) Kalium är lätttröligt och förflyttas runt som jon i växten. Den största mängden kalium behövs till osmosregleringen i cellsaften. En mindre del ingår i vissa enzymer samt i cellmembranernas passagemekanismer. (Bodin & Svensson, 1996) Eftersom cesium följer samma kretslopp i naturen som kalium (FOI, 2002; Nisbet & Shaw, 1994) bör potatis även ha kapacitet att ta upp mycket radiocesium om det finns i marken.

Vid bladgödsling tas mikronäringsämnena upp av växten genom klyvöppningar och kutikula (vaxskiktet på bladytan). Eftersom cesium är ett mikronäringsämne förmodas det radiocesium som finns i depositionen att tas upp på likartat sett som vid bladgödsling.

2.8.4 Radiocesiumhalter i förädlad potatis

Vid kokning av potatis kommer halten radiocesium att minska. Enligt IAEA:s handbok (1994) (International Atomic Energy Agency) blir radiocesiumhalten då 80-90 % av halten i rå potatis. Om den kokta potatisen dessutom skalas blir radiocesiumhalten 60 %. Genom att enbart skala den råa potatisen är den beräknade halten 60-80% av den oskalade. Vid förädling till andra potatisprodukter såsom chips och pommes frites har antagits att ca 70 % av cesiumhalten finns kvar (Rosén & Eriksson, 2007).

2.8.5 Forskningsresultat kring överföring av cesium till gröda

Det finns ett flertal studier kring överföring av radiocesium från jord till potatis både genom experimentella försök (Knatko *et al.*, 2000; Strandberg, 1994) och genom Tjernobylyolyckan (Francic *et al.*, 2007; Rosén, 1996; Rosén *et al.*, 1996). Tjernobylyolyckan inträffade i slutet av april 1986, precis innan växtsäsongen hade kommit igång. De enda grödor som vid denna tidpunkt kommit upp var vallar och höstsådda grödor. Potatisen var inte ens satt vid denna tidpunkt. Därför finns endast en begränsad mängd med data från direktdeponi i växande gröda efter Tjernobylnedfallet.

Aarkrog (1975) konstaterade i en studie av direktdeponi i spannmål att utvecklingsstadiet är avgörande för hur stor överföringen av radioaktiva ämnen blir. Samtidigt som potatisförsöket som sammanställs i denna rapport utfördes, pågick även studier på Uppsala Näs försöksstation av vall, spannmål och grönsaker med liknande försöksuppläggning och syfte (Eriksson *et al.*, 1998a & b). Slutsatser från dessa undersökningar är att innehållet av radiocesium i grödan påverkas av vilket utvecklingsstadium som grödan befinner sig i och tidpunkten för nedfallet.

I ett område kallat Chernigov som är beläget nära Tjernobyly, gjorde Van der Perk *et al.* (2000) studier på överföringsfaktorer av radiocesium från jord till jordbruksprodukter, däribland potatis. De gjorde en överföringsfaktormodell som överensstämde bra med den uppmätta aktiviteten i potatis. Värdena på överföringsfaktorn varierar inte lika mycket för potatis som för andra grödor. En betydande orsak kan vara att potatis odlas på en liten variation av jordar.

Den enda litteratur som hittats där effekterna av direktdeponi på potatis studerats är Middleton (1959). I denna studie undersöktes kontamineringsgraden av olika grödors ätbara delar, däribland potatis, vid kontaminering på de överjordiska delarna av dessa grödor. Studien visar att det sker en snabb minskning av radioaktiva ämnena direkt efter ett nedfall. Den viktigaste orsaken till denna minskning är avspolning via regn.

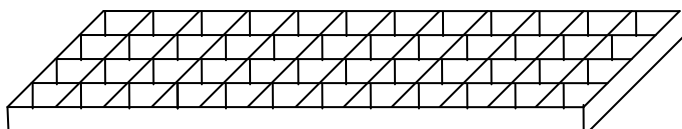
Aarkrog (1992) visade att kontamineringsgraden av livsmedel på grund av Tjernobylyolyckan till stor del påverkades av årstiden för nedfallet. Francic *et al.* (2007) bekräftar detta i en nyligen genomförd studie där man fann att årstiden för nedfallet vid en kärnkraftsolycka är den avgörande faktorn för hur stor överföringen blir från potatis till människan. Eriksson *et al.* (1998a) fann att uppfångningskapaciteten varierade med utvecklingsstadium hos grödan. Vid tidiga stadier var uppfångningen låg. Som högst var uppfångningen vid mitten av säsongen och vid slutet av säsongen minskade uppfångningen igen. Denna minskning i senare stadier förklaras av förhållandet bladyta/vikt hos växten: i och med att växten fortsatte att öka i vikt så minskade halten genom utspädningseffekten.

3. Material och metoder

I försök har ^{134}Cs deponerats på potatis vid olika tidpunkter under odlingssäsongen. Försöken utfördes på Uppsala Näs Försöksstation (Unäs) ($59^\circ 49 \text{ N}$, $17^\circ 40 \text{ E}$, 5 m över havet) under odlingssäsongerna 1990, 1991 och 1992.

3.1 Försöksplan

Ett så kallat ramförsök enligt Fredriksson (1962) användes. Ramarnas yta var $0,25 \text{ m}^2$ med djupet 0,3 m (0,5x0,5x0,3) (se figur 8). Genom detta arrangemang befann sig jordmaterialet i varje ruta under samma förhållanden som i ett kärnförsök medan försöksväxten var utsatt för fältförhållanden med påverkan från klimat och underliggande jord. Med denna metodik kombinerades alltså fördelarna från de båda typerna av experimentella tillvägagångssätt. Två olika matjordstyper 0-25 cm var utplacerade på ett en meter tjockt alvskikt av moig sand. Matjordstyperna var moig sand (17,6 % ler) och lättlera (33,3%) (Fredriksson *et al.*, 1969).



Figur 8. Ramarnas utformning.

Ramförsöket anlades redan i början av 1960-talet. Under det första verksamma året (1961) behandlades matjorden för att studera nuklidöverföringen från kontaminerad jord till olika jordbruksgrödor. $35,7 \text{ MBq/m}^2$ ^{137}Cs blandades homogent in i matjorden i försöksrutorna i rad 1 och 2 och $13,4 \text{ MBq/m}^2$ ^{90}Sr i rad 3 och 4, se figur 9 (Fredriksson *et al.*, 1969).

rad 1	Moig sand	$35,7 \text{ MBq/m}^2$ Cs-137																		
rad 2	Lättlera	$35,7 \text{ MBq/m}^2$ Cs-137																		
rad 3	Moig sand	$13,4 \text{ MBq/m}^2$ Sr-90																		
rad 4	Lättlera	$13,4 \text{ MBq/m}^2$ Sr-90																		

Figur 9. Ursprunglig tillsats av radionuklider i matjorden 1961.

År 1990 startade försöket med potatis. Eftersom det redan fanns ^{137}Cs i jorden från tidigare försök så använde man sig i detta försök av cesiumisotopen ^{134}Cs . Utöver kontamineringen från tidigare års försök innehöll jorden även ^{137}Cs från dels kärnvapensprängningarna på 1950- och 60-talen och dels från Tjernobylyolyckan 1986. Halten ^{137}Cs som härrörde från dessa händelser uppmättes i jorden kring Uppsalanäs försöksstation år 1986/-87 till 35 kBq/m^2 (pers. komm., Eriksson, 2007). Tjernobylnedfallet innehöll även ^{134}Cs och mängden som släpptes ut var drygt hälften så stor som ^{137}Cs (Åhman, 2005). På grund av ^{134}Cs korta halveringstid på ca två år så hade mängden Cs¹³⁴ vid potatisförsökets start minskat till drygt 25-35 % av det ovan angivna värdet.

Potatissorten som användes var Maria som är en medeltidig sort. Gödslingsgivan motsvarade 600 kg 16-7-13 NPK per hektar och år (Eriksson *et al.*, 1998b). Behandlingsleden i potatisförsöket innefattade fem tidpunkter för simulerat nedfall under odlings säsongen utom 1992 då antalet var fyra. Dessutom fanns extraled av de olika behandlingarna för upptagning och analys av blast och knölar vid olika tidpunkter. Antalet upprepningar var två till fyra för de olika behandlingarna. I ett fåtal fall förekom en respektive sex upprepningar.

Samtliga år särskiljdes de båda jordarterna som olika behandlingsled vid försökets genomförande men både år 1990 och 1991 slogs dock de två jordartstyperna parvis ihop före analys inom varje kombination av behandlingar. Orsaken till detta var att erfarenheter från tidigare försök visat att det inte var någon skillnad mellan de olika jordarterna. Från 1992 finns däremot data från de olika jordarterna och resultatet antyder att det fanns en skillnad mellan de olika jordarterna, åtminstone i potatisförsöket.

3.2 Utförande

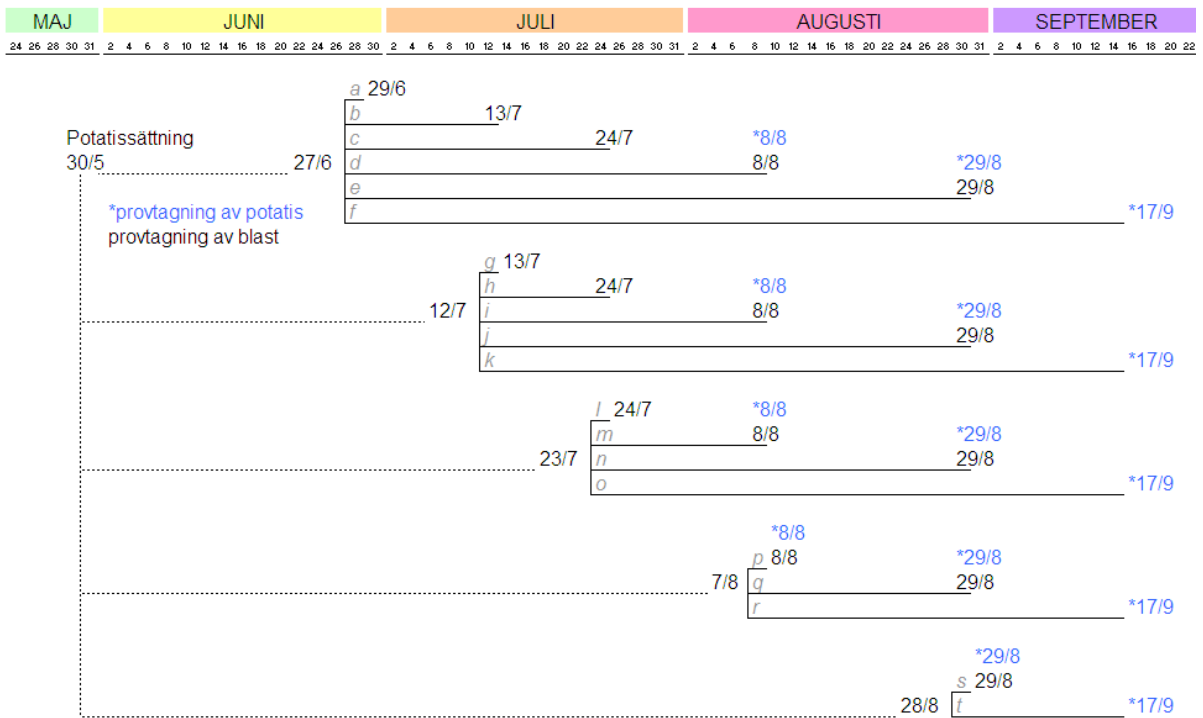
3.2.1 Sättning och deposition

Potatisen sattes 30/5, 29/5 och 25/5 under åren 1990, 1991 respektive 1992. I varje ram sattes tre knölar diagonalt enligt figur 10 nedan. För att eliminera spridning till intilliggande rutor var det bäst att deponera försöksrutorna sektionvis på så sätt att de rutor som deponerades samma datum låg intill varandra. Det innebar att behandlingarna inte fördelades slumpmässigt över försöksrutorna. Däremot hade det varit möjligt att slumpmässigt välja rutor för provtagning vid olika tidpunkter men inte heller detta gjordes. Datum för sättning, deponering och provtagning återfinns i figur 11 a - c. Vid några tillfällen har potatisupptagningen skett några dagar senare än blastskörden. I samtliga tabeller och diagram har datumet för blastskörd använts för både potatis- och blastskördetidpunkt (korrekta tidpunkter för provtagning av potatisknölen finns i figur 11 a - c).

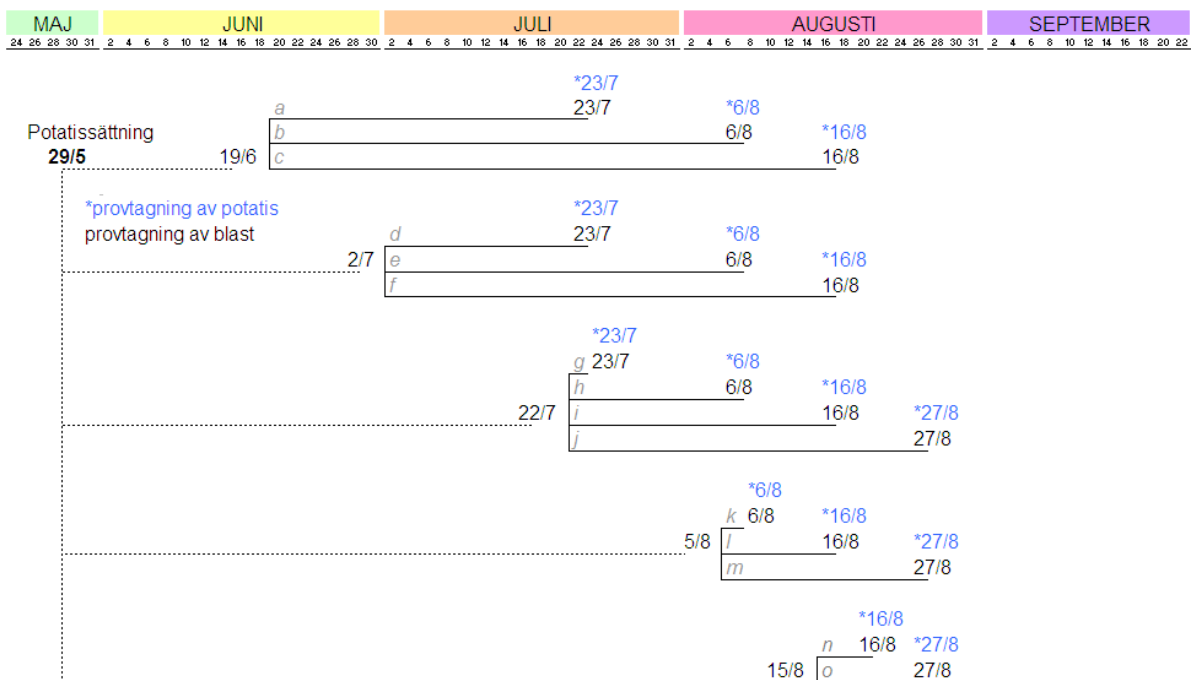


Figur 10. Tre potatisknölar sattes diagonalt i varje ram (bilden är tagen 1992 i samband med första depositionen 11/6).

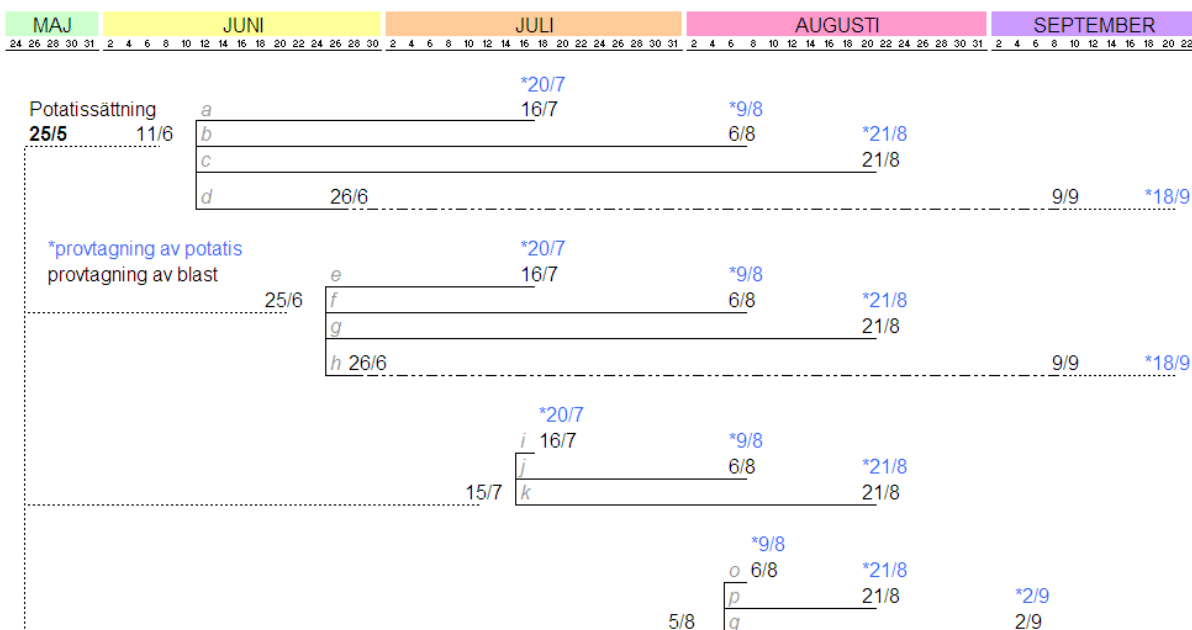
1990 års försök



1991 års försök



1992 års försök



Figur 11 a - c. Tidpunkter för sättnig, deposition samt provtagning i 1990, 1991 och 1992 års försök (*datum för provtagning av potatisknöl).

Radionukliden som användes i den artificiella depositionen var ^{134}Cs och den tillreddes genom att blanda ^{134}Cs med 0,1 M HCl och därefter späda med vatten upp till volymen 0,25 liter. HCl-tillsatsen gjordes för att efterlikna regnvattnets naturliga pH. Innan depositionen genomfördes fuktades alla provrutor och deras växtlighet med en vattenlösning innehållande en ytterst liten mängd detergent motsvarande 1 mm nederbörd. Detta gjordes för att få samma förhållanden som vid våtdeposition av nedfallet. För att efterlikna regn sprayades lösningen jämt fördelat över försöksrutorna med en sprayflaska. Totalt motsvarade vattenmängden 1 mm regn. Denna vätskevolym var ytterst liten vilket ledde till att mer ^{134}Cs fastnade på bladytan jämfört med naturlig våtdeposition och följden blev en effektivare kvarhållning av det deponerade materialet (Eriksson *et al.*, 1998a; Middleton, 1959).

Vid sprayningen placerades aluminiumramar med höjden en meter över varje provruta för att minimera risken av spridning till intilliggande rutor. Ramarna fick ligga kvar ett dygn efter depositionstillfället för att skydda försöksrutorna från inverkan av väderförhållandena under denna tid. På så sätt blev behandlingen blir mer likvärdig under säsongen och mellan åren.

Samtliga tre år användes en högre nuklidkoncentration vid första depositionstillfället. Orsaken var att blasten var lite utvuxen i början av odlings säsongen och för att vara säker på att komma upp i mätbara halter i potatisknölen vid analys ökades därför koncentrationen. År 1990 deponerades $25,36 \text{ kBq/m}^2$ vid första depositionstillfället och $5,72 \text{ kBq/m}^2$ vid de senare. Åren 1991 och 1992 var motsvarande siffror $19,55 \text{ kBq/m}^2$ respektive $13,03 \text{ kBq/m}^2$.

3.2.2 Skörd och preparering av proverna

Skörden skedde genom att blasten först klipptes av ca 5-10 cm ovan mark och därefter togs potatisknölarna upp. Blast- och potatisproven vägdes och sedan skivades potatisen i tunna

skivor. Därefter torkades blast- och potatisprov i värmeskåp under en dryg vecka i 80°C för att bestämma torrsubstansmängd. År 1992 skalades dessutom en del av potatisproven. De torkade och vägda blast- och potatisproven finmalades så att de passerade en 2 mm såll. Därefter överfördes proverna till så kallade scintburkar för mätning av innehållet av radiocesium. Scintburkarna fylldes helt och beroende på provmängd användes burkar med volymen 180 ml eller 330 ml.

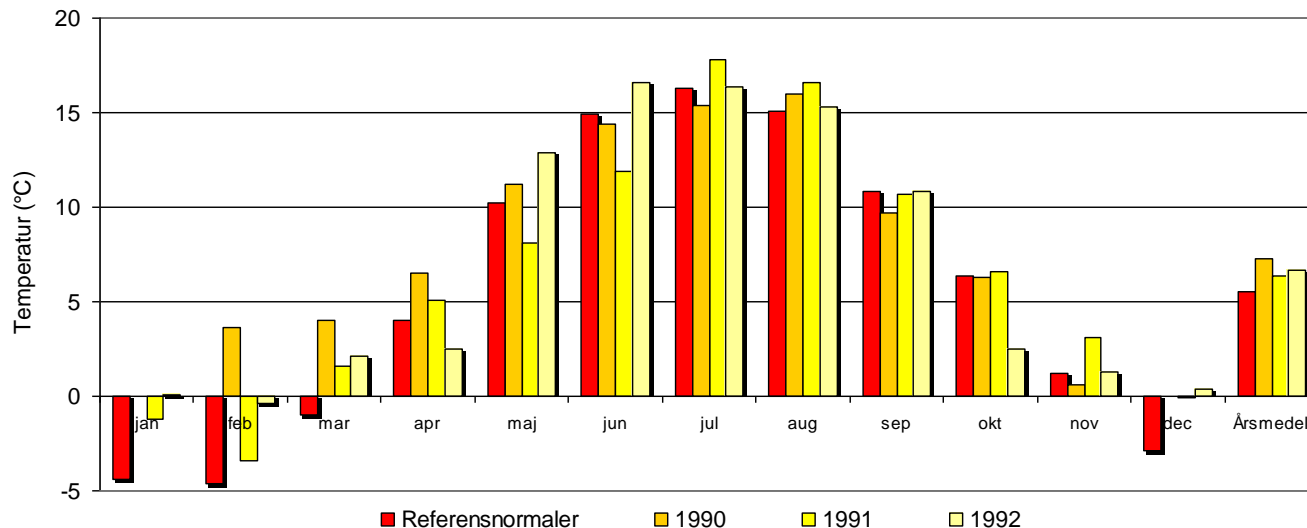
3.2.3 Mätning av aktivitet

År 1990 användes en Auto-gammadetektor för mätning av radiocesium. Mätningarna åren 1991 och 1992 utfördes med en HPGe-detektor (high purity germanium) som är en typ av halvledardetektor (fabrikatet ORTEC). Samtliga mätningar skedde på Institutionen för radioekologi vid SLU i Uppsala.

Mättiden varierade med aktivitetskoncentrationen i proverna. Vid låga aktivitetskoncentrationer krävs en längre mättid än vid höga. Mätvärdena avlästes då detektorn angav mindre än 5 % mätfel eller då proverna stått i detektorn mer än 24 timmar.

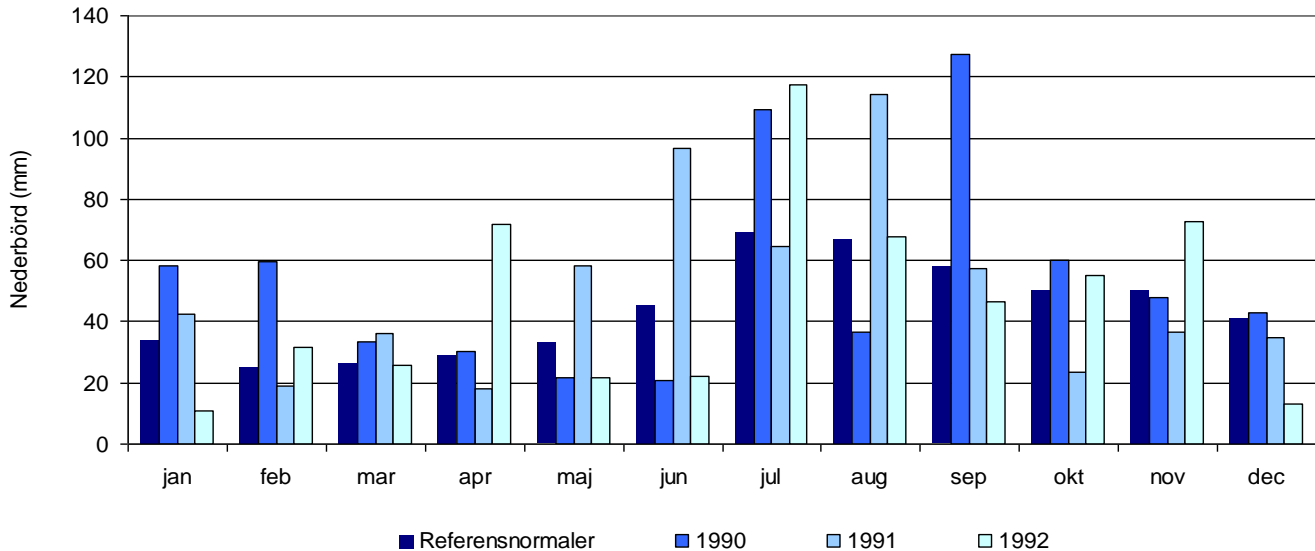
3.3 Temperatur och nederbörd under försöksperioden

Temperaturen under de tre åren följde relativt väl referensnormalen, se figur 12. 1991 års temperatur under maj och juni var lägre än normalt medan däremot juli och augusti var varmare än normalt. Temperaturen under 1992 var i motsats varmare under maj och juni. Årsmedelvärdena låg alla något över referensnormalen.



Figur 12. Den månadsvisa och årliga temperaturen på Ultuna för åren 1990-1992 (data från SLU:s klimatstation) jämfört med SMHI:s referensnormaler (Alexandersson *et al.*, 2001).

Månadsvis nederbörd för samtliga år i förhållande till referensnormalen redovisas i figur 13 nedan. Under åren 1990 och 1992 var juli den mest nederbördsrika månaden jämfört med referensnormalen medan det 1991 regnade mest under juni och augusti. Den totala årsvisa nederbörden var något högre än referensnormalen (527 mm) för samtliga år. 1990 var det år som generellt var mer nederbördsrikt än de andra.



Figur 13. Månadsvis nederbörd vid Ultuna klimatstation för åren 1990-1992 (data från SLU:s klimatstation) jämfört med SMHI:s referensnormaler (Alexandersson *et al.*, 2001).

3.4 Beräkningar

Eftersom den första depositionen under samtliga år hade en högre koncentration av ^{134}Cs blev även motsvarande halter i potatisen högre. Dessutom var koncentrationerna mellan de olika åren olika. För att kunna jämföra halterna inom och mellan åren räknades samtliga värden om till en depositionsnivå på 10 kBq med hjälp av en överföringsfaktor TF_g . Den är ett mått på graden av överföring av radioaktiva ämnen från marken till den växande grödan och anges som en kvot mellan aktiviteten i den skördemogna grödan (Bq/kg ts) och aktiviteten i depositionen per ytenhet ($\text{m}^2/\text{kg ts}$). TF står för *transfer factor* och g för *ground*. TF_g är proportionell mot kontamineringsgraden av grödan men oberoende av nedfallsstorleken vid tillfället för depositionen (Eriksson *et al.*, 1998a).

* Överföringsfaktorn TF_g ($\text{m}^2/\text{kg ts}$)

$$TF_g = \frac{\text{Aktivitetskoncentrationen i växt (Bq/kg ts)}}{\text{Markdepositionen (Bq/m}^2\text{)}}$$

Mängden ^{134}Cs påverkades hela tiden av det fysikaliska sönderfallet. Eftersom mätning av aktiviteten skedde under olika lång tid efter provtagning så har samtliga halter räknats tillbaka till provtagningsdagen för att få jämförbara aktivitetskoncentrationer.

** Tillbakaräkning av aktivitet till provtagningsdag*

$$A' = A_0 * e^{-\lambda \cdot t}$$

A' = uppmätt aktivitet (Bq)

A_0 = aktivitet vid provtagning (Bq)

λ = halveringstiden (s^{-1})

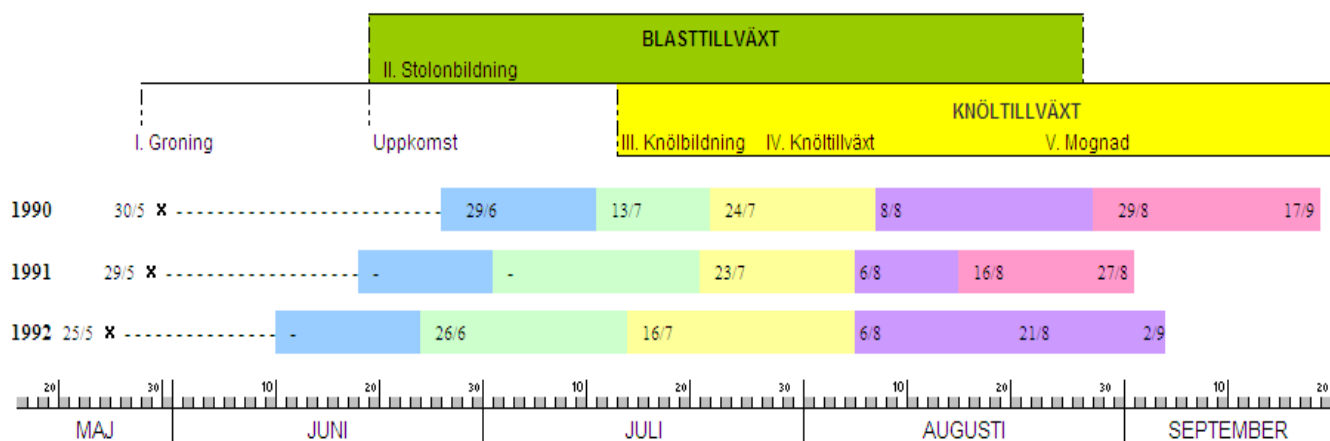
t = tid mellan provtagning och mätning (s)

4. Resultat & diskussion

4.1 Halt av ^{134}Cs i skördemogen potatis efter olika nedfallstidpunkter

I följande avsnitt redovisas nedfallstidpunktens inverkan på halten ^{134}Cs i potatis och blast vid skörd.

Det finns en hel del studier som visar att upptagningen av olika ämnen påverkas av vilket utvecklingsstadium grödan befinner sig i. Utvecklingsskalan för potatis finns beskriven i avsnitt 2.8 och i figur 6. Utifrån sättningsstidpunkt har jag skattat potatisens utvecklingsstadium vid de olika nedfallstillfällena (se figur 14). År 1992 sattes potatisen något tidigare vilket gör att de olika utvecklingsstadierna uppnåddes något tidigare än under de två föregående åren.

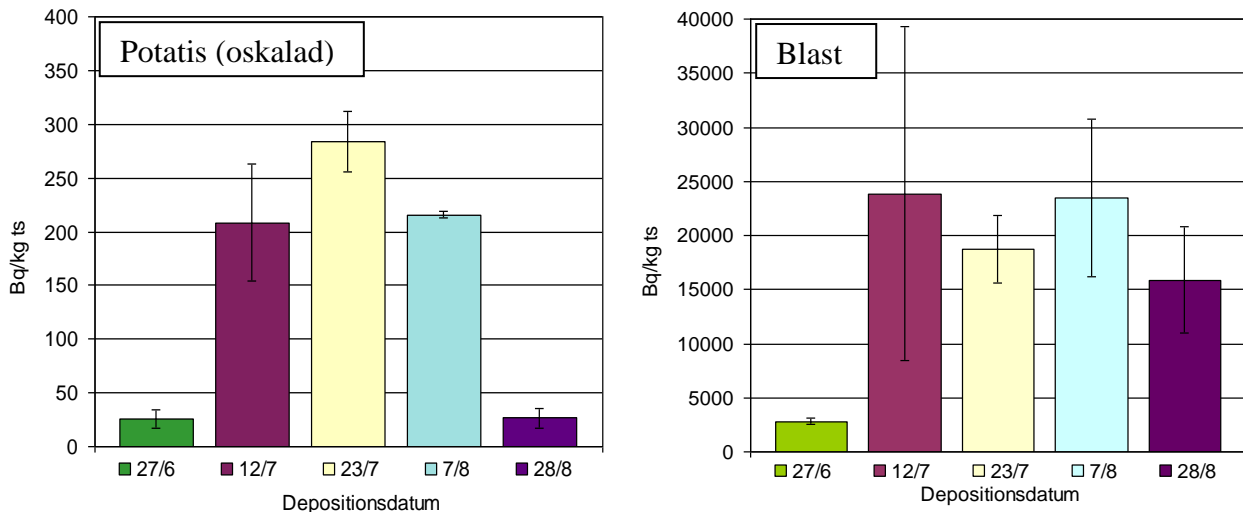


Figur 14. Potatisens ungefärliga utvecklingsstadium vid olika tidpunkter för deposition och provtagning under försöksåren 1990 – 1992 (de olika färgerna symboliserar depositionstidpunkter och angivna datum står för provtagningstillfällena). Anpassning till utvecklingsskala enligt Bodin & Svensson (1996).

4.1.1 År 1990

Under odlingssäsongen 1990 utfördes fem depositioner. Figur 15 a och b nedan visar ^{134}Cs -halten i potatis respektive blast vid skörd 29/8. Halten ^{134}Cs i den skördemogna potatisen (figur 15 a) var som högst efter en deposition i mitten av odlingssäsongen (23/7), en dryg månad innan potatisupptagningen skedde. Vid tidigare depositionstillfällen blev halten i potatis vid skörd lägre ju tidigare nedfallet skedde. Under den senare delen av säsongen blev ^{134}Cs -halten i den skördemogna potatisen lägre ju närmare potatisupptagningen som nedfallet skedde.

För ^{134}Cs -halten i blasten (figur 15 b) ses inte ett lika tydligt mönster. Den stora standardavvikelsen på stapeln för depositionen den 12/7 tyder på ett avvikande felaktigt värde. Om vi bortser från detta värde som förmodas vara högre än normalt, följde halten ett liknande mönster som för potatisen med skillnaden att den maximala halten inföll något senare, vid depositionen 7/8.



Figur 15 a och b. Effekt av olika nedfallstidpunkter på ^{134}Cs -halt (Bq/kg torrs substans) i skördemogen potatis och blast år 1990 vid skörd 29/8. Medelvärde och standardavvikelse för 2 upprepningar (undantag för sista depositionen 28/8 där det var 4 upprepningar). De verkliga halterna har räknats om så att de motsvarar nedfallsstorleken 10 kBq/m^2 (se avsnitt 3.4).

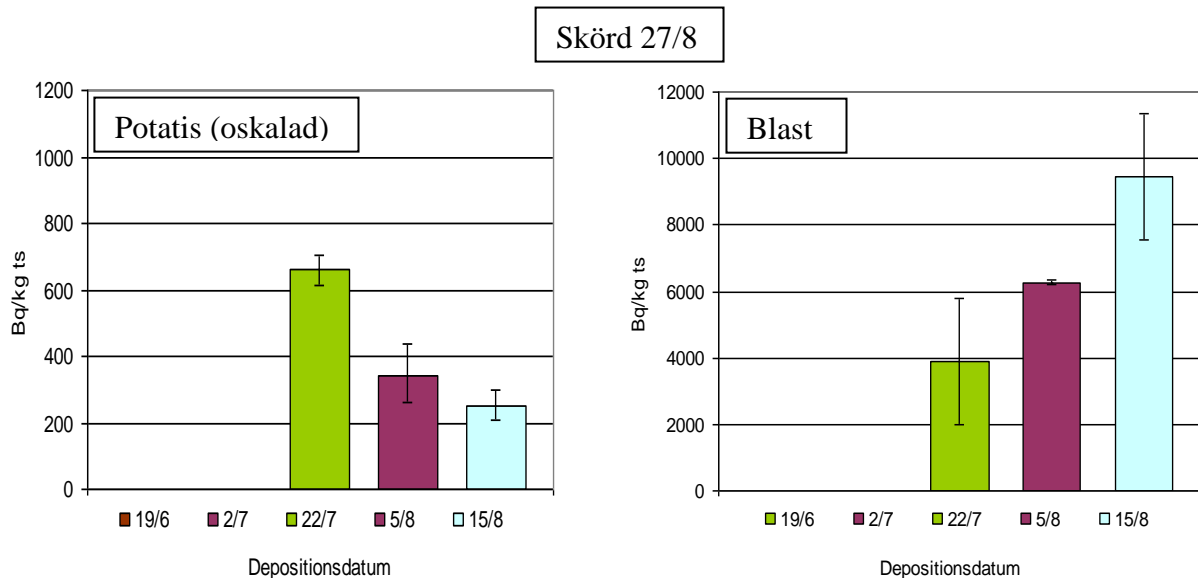
4.1.2 År 1991

Även i 1991 års försök utfördes fem depositioner. Halten ^{134}Cs i den skördemogna potatisen och i blasten redovisas för två skördetidpunkter, en senare (27/8) (figur 16 a och b) och en tidigare (16/8) (figur 17 a och b). Den senare motsvarar samma skördetidpunkt som redovisades i 1990 års försök. För denna tidpunkt finns enbart data från senare delen av säsongen på grund av att det inte längre fanns kvar några upprepningar att skörda från de tidiga depositionstidpunkterna (se figur 11 c i avsnitt 3.2). Därför har jag valt att även ta med ett tidigare skördetillfälle (16/8) där det finns data för samtliga depositioner. Eftersom potatisarten som användes i försöket är en medeltidig sort kan potatisen även då räknas som skördemogen. Enligt anteckningar hade 8 - 12 potatisar per planta bildats vid skörd 16/8. Knölarnas storlek vid denna tidpunkt vet vi däremot inte men från 5/8 finns anteckningar om att potatisarna var 4 - 8 stycken och medelstora. Resultaten från 16/8 redovisas i figur 17 a och b.

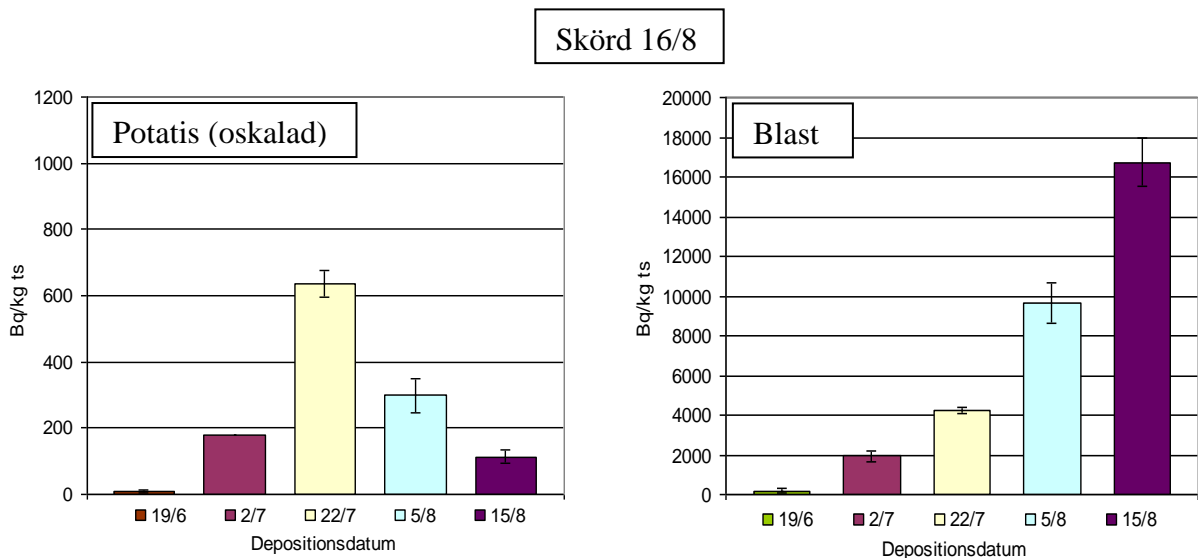
Utifrån resultaten från det sena skördetillfället, med data enbart från led med depositioner under den senare delen av säsongen, kan vi konstatera att ^{134}Cs -halten i den skördemogna potatisen följde samma mönster som sågs 1990; en högsta halt vid mitten av säsongen som därefter sjönk ju senare in på säsongen som nedfallet skedde (figur 16 a). Samma mönster ses för ^{134}Cs -halten i potatis skördad vid det tidigare tillfället (figur 17 a) och även från den första delen stämmer mönstret väl överens med det tidigare konstaterade med ett lägre värde ju tidigare nedfallet skedde.

För blasten gäller en högre ^{134}Cs -halt ju senare nedfallet skett vid skörd 27/8 (figur 16 b) vilket bryter mönstret som sågs under 1990 års säsong med avtagande halt mot slutet. Inte heller vid det tidigare skördetillfället 16/8 (figur 17 b) ses någon minskning i halt vid sena nedfall. Att kurvan böjer av i slutet i 1990 års försök kan förklaras av att blasten vid

detta sena stadium enligt anteckningar var nedvissnad till 75 % och därför fångade upp betydligt mindre radiocesium. Eftersom den sista depositionen år 1990 skedde två veckor senare än den sista år 1991 är de inte riktigt jämförbara. Därför är det möjligt att halten i blasten hade varit lägre vid en sen deposition även 1991.



Figur 16 a och b. Effekt av olika nedfallstidpunkter på ^{134}Cs -halt (Bq/kg ts) i skördemogen potatis och blast år 1991 vid skörd 27/8. Medelvärde och standardavvikelse för 2 upprepningar (undantag 15/8 där 6 upprepningar skett). Nedfallsstorleken är 10 kBq/m².

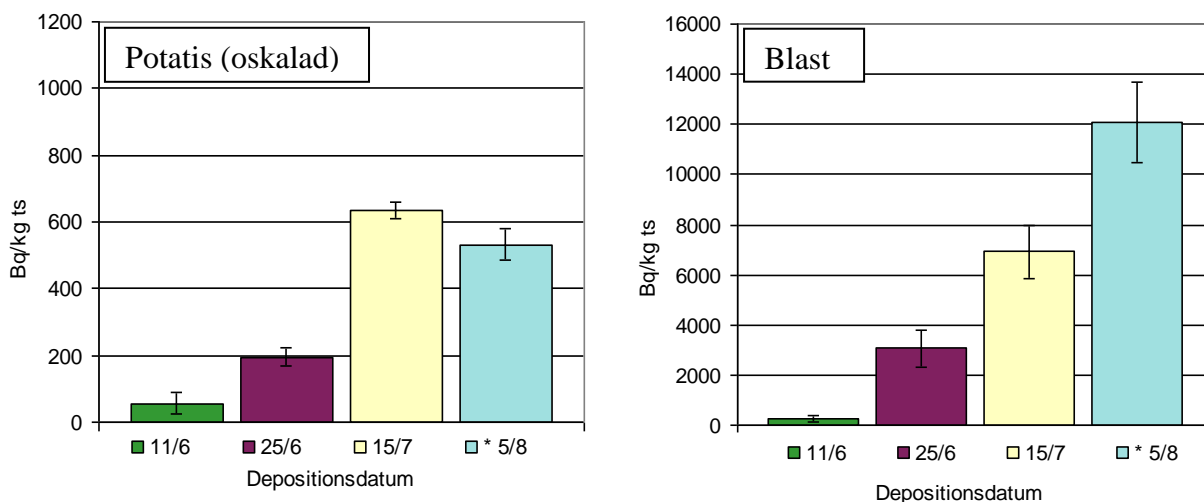


Figur 17 a och b. Effekt av olika nedfallstidpunkter på ^{134}Cs -halt (Bq/kg ts) i skördemogen potatis och blast år 1991 vid skörd 16/8, dvs. 11 dagar tidigare jämfört med figur 16 a och b. Medelvärde och standardavvikelse för 2 upprepningar. Nedfallsstorleken är 10 kBq/m².

4.1.3 År 1992

Figur 18 a och b visar halten ^{134}Cs i skördemogen potatis respektive blast efter olika tidpunkter för nedfall i 1992 års försök. Fyra depositioner utfördes under odlings säsongen. För aktuellt skördedatum saknas dock data från det sista depositionsdatumet 5/8 och därför anges istället ^{134}Cs -halten vid provtagning den 2/9, dvs. ca. två veckor senare. Mönstret som konstaterats de två tidigare åren för den skördemogna potatisen kommer igen även i 1992 års försök (figur 18 a). Stapeln för den sista depositionen hade antagligen varit lägre om detta led skördats vid normal skördetid (21/8). En senare skördetid ger högre halt i potatisen eftersom plantan då haft längre tid på sig att föra över radiocesium till knölna.

Figur 18 b visar att blastens ^{134}Cs -halt vid skörd 21/8 blev högre ju senare på växtsäsongen som nedfallet inträffade. Den sista stapeln som visar halten radiocesium i blasten efter deposition 5/8 kanske skulle ha varit lägre om detta led skördats vid normal skördetid. Detta skulle i så fall bero på att mer cesium avspolats genom regn och vind under de två veckorna som skördetiden fördröjdes med.



Figur 18 a och b. Effekt av olika nedfallstidpunkter på ^{134}Cs -halt (Bq/kg ts) i skördemogen potatis (a) och blast (b) år 1992 vid skörd 21/8. Medelvärde och standardavvikelse från fyra upprepningar. *Halten för sista depositionen 5/8 är från skörd 2/9, dvs. ca. två veckor senare än för de andra depositionsstillfällena. Nedfallsstorleken är 10 kBq/m^2 .

4.1.4 Jämförelse mellan de tre åren

Vid tidiga nedfall har blasten knappt kommit upp och dess uppfångning är därför minimal. Det innebär att det är en ytterst liten mängd radiocesium som kan föras över från blasten till potatisknölen när den väl bildas. Det cesium som då finns i potatisen vid skörd kommer nödvändigtvis inte enbart från blasten utan en del kan även ha tagits upp via rötterna från jorden.

För samtliga år blir halten i skördemogen potatis som högst om nedfallet sker i mitten och senare delen av juli. Vid denna tidpunkt har knölbildningen (utvecklingsstadium III) skett och knöltillväxten (utvecklingsstadium IV) har påbörjats. När knölbildningen väl har startat går nämligen alla fotosyntesprodukter ner till potatisknölarna (Bodin & Svensson, 1996; Harris, 1978). Samtidigt som detta sker hämmas bladtillväxten (Harris, 1978). Den högsta

halten i skördemogna potatis efter nedfall mitt i säsongen beror alltså på att uppfångningen i blasten är maximal samtidigt som överföringen till potatisknölarna är hög.

Sker nedfallet under senare delen av växtsäsongen blir halterna gradvis lägre i den skördemogna potatisen ju senare nedfallet sker. Eftersom tiden mellan nedfall och skörd blir kortare kan en möjlig orsak till de lägre halterna vara att radiocesium inte hinner överföras till potatisknölen då. En annan orsak till de lägre halterna av ^{134}Cs i potatisknölen kan vara att kaliumbehovet hos potatisplantan varierar under dess utveckling. Som konstaterats i tidigare avsnitt är potatisens kaliumupptag stort under blasttillväxten men minskar snabbt när blasten växt färdigt. Detta kan innebära att plantan inte tar upp kalium lika aktivt under senare delen av säsongen. Eftersom kalium och cesium följs åt skulle detta kunna förklara de lägre cesiumhalterna i potatisen under senare delen av säsongen.

Det mönster som konstaterats samtliga tre år för blasten är att halten ^{134}Cs vid skörd är högre ju senare nedfallet sker. Detta beror dels på att radiocesium fångas upp bättre ju större blastytan är. Trots att blastytan i mitten av säsongen nått sitt maximum fortsätter halten i blasten att bli högre vid skörd ju senare depositionen sker. Detta kan tyda på att en mindre mängd radiocesium överförs till potatisknölen i sena stadier eftersom potatisarna har växt färdigt och plantan då har en mindre aktiv ämnestransport. Den främsta orsaken är dock att tiden fram till skörd är kortare vilket ger en ökad kvarhållning av radiocesium. Eftersom exponeringstiden för nederbörd och vind blir kortare transporteras mindre radiocesium från blasten ner till marken.

4.2 Förändringar av ^{134}Cs -halt i potatisplantan under säsongen

I detta avsnitt presenteras förändring av ^{134}Cs -halten över tiden i potatis och blast under de tre odlingssäsongerna år 1990 - 1992. Med hjälp av överföringsfaktorer är samtliga faktiska uppmätta värden omräknade till halter som gäller vid ett nedfall på 10 kBq. Denna nedfallsstorlek motsvarar den genomsnittliga markbeläggningen av ^{137}Cs i Sverige i samband med Tjernobylnedfallet.

4.2.1 År 1990

Tabell 2 visar förändringen av halten ^{134}Cs över tiden i blast respektive potatis under säsongen 1990. En första provtagning skedde dagen efter det att depositionen utfördes, med undantag för den första depositionen då provtagningen skedde två dagar senare. Detta värde ger oss ett mått på den initiala uppfångningen i blasten och är markerat i blått i tabellen. Vid den tidigaste depositionen (27/6) är ^{134}Cs -halten i blasten som högst vid första provtagningen, två dagar efter depositionen. Därefter går halten snabbt ner till en femtedel av det initiala värdet och ligger kvar där resten av säsongen. Den snabba minskningen av halten mellan första och andra provtagningen kan bero på att blasten har en stor tillväxt under denna period (utvecklingsstadium II: blasttillväxt) som späder ut radiocesium. Avspolning genom vind och nederbörd är ytterligare en bidragande faktor till minskningen.

Även vid andra depositionstillfället (12/7) ses en kraftig minskning av blastens halt mellan första och andra provtagningstillfället. För resterande depositioner går det däremot inte att urskilja något klart mönster i haltförändringen och många av mätvärdena har höga standardavvikelser vilket ger en stor osäkerhet beträffande trenden.

Halten i potatisknölen förändras inte nämnvärt efter den första depositionen under säsongen utan ligger kring ett värde på 30 Bq/kg ts. Efter den andra och tredje depositionen (båda under juli månad) ligger halten mellan 200 – 400 Bq/kg ts under säsongen. Med tiden tenderar halten att bli lägre. Denna minskning beror troligen på utspädningseffekten då potatisen tillväxer. Den allra sista depositionen ger låga ¹³⁴Cs-halter vilket tyder på att det inte sker någon nämnvärd transport ner till potatisknölen. Förmodligen är potatisarna färdigutvecklade vid denna tidpunkt och inlagringen har upphört.

Tabell 2. Förändringar av halt ¹³⁴Cs (Bq/kg ts) i blast och potatis efter olika tidpunkter för deposition under växtsäsongen 1990. Värdena är omräknade till ett nedfall på 10 000 Bq med hjälp av överföringsfaktorer. Den initiala uppfångningen i blasten för respektive nedfallstidpunkt är markerat i blått. Medelvärde och standardavvikelse för 2 upprepningar (* 4 upprepningar).

	Depositions- datum	Provtagningsdatum					
		1 29/6	2 13/7	3 24/7	4 8/8	5 29/8	6 17/9
Blast	27/6	9619 ± 6288	*2200 ± 72	2516 ± 1426	2481 ± 68	*2799 ± 302	
	12/7		25531 ± 5602	14537 ± 1444	19079 ± 3696	23860 ± 15408	
	23/7			15927 ± 2285	19440 ± 2640	18741 ± 3131	
	7/8				22145 ± 1583	23468 ± 7292	
	28/8					15883 ± 4940	
Oskalad potatis	27/6				31 ± 27	26 ± 8	*35 ± 6
	12/7				247 ± 22	208 ± 55	221 ± 98
	23/7				409 ± 22	284 ± 28	295 ± 81
	7/8				66 ± 17	216 ± 3	194 ± 2
	28/8					26 ± 9	23 ± 11

4.2.2 År 1991

Tabell 3 visar värden för ¹³⁴Cs-halten i potatis respektive blast under år 1991. För samtliga depositioner var halten ¹³⁴Cs i blasten högst vid den första provtagningen. Med tiden blir halten lägre oberoende av depositionstillfälle av samma orsak som nämnts tidigare, dels genom utspädningseffekten vid tillväxt och dels genom transport ner till marken genom påverkan av vind och nederbörd. Vid sista provtagningstillfället (27/8) var blasten enligt anteckningar nedvisnad till 75 %.

Halten ¹³⁴Cs i potatisen tenderar att bli lägre med tiden vid en deposition under första delen av säsongen. Sker depositionen i mitten av säsongen och under senare delen av säsongen tenderar halten istället att stiga ju längre tid som går efter depositionen. De tre värdena för potatis vid provtagningsdatum 23/7 (tabell 3) bygger endast på enstaka värden varför inga standardavvikelser kan anges. Orsaken var att potatisen var så liten vid denna tidpunkt att proverna från fyra rutor slogs ihop till ett samlingsprov.

Tabell 3. Förändringar av halt ^{134}Cs (Bq/kg ts) i blast och potatis efter olika tidpunkter för deposition under växtsäsongen 1991. Värdena är omräknade till ett nedfall på 10 000 Bq med hjälp av överföringsfaktorer. Den initiala uppfångningen i blasten är markerat i blått. Medelvärde och standardavvikelse för 2 upprepningar (*upprepning saknas, ** 6 upprepningar).

	Depositions- datum	Provtagningsdatum			
		1 23/7	2 6/8	3 16/8	4 27/8
Blast	19/6	443 ± 89	282 ± 196	189 ± 114	
	2/7	4004 ± 1261	2805 ± 701	1931 ± 296	
	22/7	14509 ± 3406	6577 ± 1099	4224 ± 147	3894 ± 473
	5/8		16217 ± 508	9648 ± 1054	6271 ± 78
	15/8			16720 ± 1203	** 9461 ± 1890
Oskalad potatis	19/6	* 23	4 ± 5	9 ± 5	
	2/7	* 343	254 ± 21	177 ± 2	
	22/7	* 414	667 ± 204	636 ± 40	659 ± 79
	5/8		78 ± 13	298 ± 50	342 ± 97
	15/8			114 ± 20	** 48 ± 0

4.2.3 År 1992

I tabell 4 nedan presenteras hur halten ^{134}Cs i blast och potatis förändras under säsongen 1992. Den initiala uppfångningen i blasten (markerat i blått) är som högst vid den sista depositionen, liksom tidigare år. Efter tredje depositionen, 15/7, är den initiala uppfångningen lägre än för det föregående depositionstillfället, denna svacka sågs även i 1990 års försök. Som tidigare konstaterats blir halten i blasten lägre med tiden och den största minskningen sker första tiden efter depositionen.

Potatisens ^{134}Cs -halt är som förut beskrivits låg efter den första depositionen och minskar något med tiden. Vid den andra depositionen är halten högre på grund av att blastens uppfångning ökat. Även här sjunker halten med tiden. Depositionerna därefter, i juli – augusti, ger en halt som ökar med tiden.

Tabell 4. Förändringar av halt ^{134}Cs (Bq/kg ts) i blast och potatis efter olika tidpunkter för deposition under växtsäsongen 1992. Värdena är omräknade till ett nedfall på 10 000 Bq med hjälp av överföringsfaktorer. Den initiala uppfångningen i blasten för respektive nedfallstidpunkt är markerat i blått. Medelvärde och standardavvikelse för 4 upprepningar.

	Depositions- datum	Provtagningsdatum				
		1 26/6	2 16/7	3 6/8	4 21/8	5 2/9
Blast	11/6	1224 ± 887	744 ± 513	701 ± 185	248 ± 136	
	25/6	19681 ± 2301	4479 ± 1443	3540 ± 772	3057 ± 752	
	15/7		15896 ± 1408	7031 ± 1450	6917 ± 1047	
	5/8			23201 ± 4461		12081 ± 1634
Oskalad potatis	11/6	- -	75 ± 37	67 ± 37	56 ± 39	
	25/6	- -	293 ± 94	190 ± 36	195 ± 29	
	15/7		186 ± 57	535 ± 156	634 ± 121	
	5/8			96 ± 44		531 ± 48

4.2.4 Jämförelse mellan de tre åren

För samtliga år gäller att halten ^{134}Cs i blasten minskar med tiden oberoende av tidpunkt för depositionen. Den största minskningen av halten ^{134}Cs ses direkt efter nedfallet, mellan första och andra provtagningen. Samma resultat konstaterades i en liknande undersökning av Middleton (1959) och den största faktorn bakom denna minskning var avspolning via regn.

Den initiala uppfångningen varierar med blasttillväxten med de högsta värdena i slutet av säsongen. Låga värden registrerades även vid nedfall sent i säsongen (1991) och förklaras av att blasten börjat vissna och därför får minskad uppfångning. Åren 1990 och 1992 finns en svårförklarlig svacka i initiala uppfångningen vid nedfall i mitten av juli, eftersom data tyder på att blasten var väl utvecklad både före och efter ”svackan”. En trolig förklaring kan vara att det under denna månad regnade mycket både år 1990 och 1992 (se figur 13 i avsnitt 3.3) med följden att mycket cesium spolades av från blasten direkt efter depositionen.

För potatisknölen finns tydliga mönster för alla år. Vid tidiga nedfall blir halten ^{134}Cs lägre med tiden medan den vid senare nedfall istället blir högre med tiden. Att halten ^{134}Cs i potatisen ökar med tiden efter sena nedfall stödjer resonemanget att plantan under denna tidsperiod har en mycket aktiv näringstransport ner till knölarna och effektivt för över radiocesium. Halten ökar under denna tid trots att tillväxten samtidigt är väldigt hög (utvecklingsstadium IV) och egentligen borde verka mot en lägre ^{134}Cs -halt genom utpädningseffekten. Eftersom det inte finns tillgänglig data för mängder i detta försök är det svårt att tolka och se tydliga mönster i förändringen i halt över säsongen.

I undersökningen av Middleton (1959), där syftet var att studera halter i potatis vid direktdeposition på blast, varierade halten i potatis med mindre än en faktor 10 under olika tidpunkter på odlingssäsongen. I samtliga års försök visade sig halterna ^{134}Cs i potatis hålla sig inom samma variation.

4.3 Olika nedfallsscenarioer och handlingsstrategier för att motverka höga halter

Innehållet av cesium i potatis beror i hög grad på yttre faktorer och därför är det viktigt att kunna skatta vilken halt man får vid olika scenarier och hur den förhåller sig till det aktuella gränsvärdet. Data som redovisats i tidigare avsnitt har använts för att förutsäga halter i potatis efter olika nedfallstidpunkter och vid olika nedfallsnivåer enligt Rosén & Eriksson (2007). Detta är tänkt att vara som hjälp till att avgöra om man kan vidta åtgärder för att minska halten eller om grödan måste kasseras eller kan användas till annat än livsmedelsråvara.

Den faktiska halten i potatis och blast påverkas av olika depositions nivåer i detta försök, både inom åren och mellan åren. För att spegla den relativa halten vid den enskilda depositionstidpunkten beräknas därför överföringsfaktorer. En överföringsfaktor är proportionell med grödans kontamineringsgrad men oberoende av nedfallsstorleken vid depositionstillfället (Eriksson *et al.*, 1998a). Då överföringsfaktorn avser överföring till skördemogen produkt benämns den TFG (kvot mellan aktiviteten i den skördemogna grödan (Bq/kg färskvikt) och aktiviteten i depositionen per ytenhet (Bq/m^2)). Förutsättningen för att kunna använda sig av överföringsfaktorer är att förhållandet mellan nedfallsnivå och halt i gröda är linjärt. Samma faktor kan användas i liknande situationer men det går inte att

använda en och samma faktor för att jämföra olika nedfallstidpunkter eftersom det är olika överföringsfaktorer för tidiga respektive sena nedfall.

Skattningarna av cesiumhalten i potatisknölarna har gjorts för ett tänkt nedfall vid fem olika tidpunkter under odlingsäsongen enligt samma modell som Rosén & Eriksson (2007). Tidpunkterna som anges är ungefärliga och finns sammanställda nedan. Data för tidpunkterna T0 - T2 är hämtade från Rosén & Eriksson (2007). Vid dessa tidpunkter dominerar överföring av radiocesium från jord till planta via rötterna. Den utvecklingsskala enligt Bodin & Svensson (1996) som jag grundar mina skattningar på är anpassad för Mellansverige och varierar förmodligen med var i landet potatisen odlas.

<u>Tidpunkt för nedfall:</u>	<u>Utvecklingsstadium av potatis:</u>
T0: vinterhalvåret	Viloperiod
T1: 1 maj	Sättning av potatis - <i>I. Groning</i>
T2: 22 maj	Uppkomst - <i>II. Stolonbildning</i>
T3: 12 juni	<i>III. Knölnitiering - IV. Knöltillväxt</i>
T4: 10 juli	<i>IV. Knöltillväxt</i>
T5: 1 aug	Skörd - <i>V. Mognad</i>

Överföringsfaktorn (TFg) för de olika tidpunkterna har tagits fram genom att väga samman data för de tre åren. Dessa TFg-värden finns redovisade i tabell 5 nedan och utifrån dessa kan halter i potatis vid skörd efter olika nedfallstidpunkter beräknas för andra nedfallsnivåer.

Tabell 5. TFg-värden (m²/kg färskvikt) för de enskilda åren samt på dessa baserade sammanvägda värden som använts i beräkningarna.

År	Tidpunkt för nedfall					
	T0 - T1	T2	T3	T4	T5	
					1 vecka före skörd	vid skörd
1990		0,013	0,087	0,122	0,087	0,013 - 0,030
1991		0,004	0,174	0,287	0,148	0,043
1992		0,026	0,261	0,274	-	-
Sammanvägt	0,002 *	0,01	0,17	0,22	0,11	0,03

* från Rosén & Eriksson (2007).

Beräknad genomsnittlig halt ¹³⁴Cs i skördemogen potatis (Bq/kg färskvikt) efter nedfall vid tidpunkterna T0 – T5 redovisas i tabell 6 nedan. Skattningen bygger på de TFg-värden som redovisas i tabell 5 ovan. Potatis med halter som överskrider EU:s gränsvärde på 1250 Bq/kg färskvikt kan inte användas som livsmedel (skuggade värden i tabell 6). Nuvarande gränsvärdet i Sverige är lägre och ligger på 300 Bq/kg färskvikt. Vid en eventuell framtida olycka är det dock EU:s gränsvärde som kommer att tillämpas.

Tabell 6. Beräknad genomsnittlig ¹³⁴Cs-halt i potatis (Bq/kg färskvikt) vid skörd efter nedfall vid tidpunkterna T0 - T5. Skuggade halter ligger över EU:s gränsvärde 1250 Bq/kg friskvikt.

Nedfallsnivå kBq/m ²	Tidpunkt för nedfall					
	T0 - T1	T2	T3	T4	T5	
					1 vecka före skörd	vid skörd
10	20	230	1700	2170	1090	300
100	200	1300	17400	21700	10900	3000
1000	2000	13000	174000	217000	109000	30000

4.3.1 Motåtgärder

Vid ett nedfall på 10 kBq, det vill säga ett nedfall som ungefär motsvarar medelnedfallet i Sverige efter Tjernobylyckan, är de kritiska tidpunkterna för nedfallet i mitten av säsongen, det vill säga under T3 och T4 (tabell 6). Nedfall som sker tidigare (T0 – T2) eller senare (T5) ger halter under gränsvärdet.

Vid T3 befinner sig potatisen i utvecklingsstadium III - IV, *knölbildning och knöltillväxt*. En möjlig motåtgärd vid denna tidpunkt är att kaliumgödsla. Kaliumgödsling reducerar i de flesta fall överföringen av radiocesium eftersom radioaktivt cesium tar samma väg i naturen som kalium. Kaliumgödsling är effektivt vid tidiga utvecklingsstadiet och kan då ge en halvering av cesiumhalten (Rosén & Haak, 2006).

För nedfall under T4 är det för sent att kaliumgödsla. Potatisen befinner sig här i senare delen av utvecklingsstadium IV, *knöltillväxt*. En möjlig motåtgärd från och med denna tidpunkt är att direkt efter nedfallet kapa av blasten och på så sätt förhindra att radiocesium translokeras ner till knölarna. Därefter kan man låta potatisarna ligga kvar i jorden tills det är dags för skörd. Detta fungerar bara i sena utvecklingsstadiet då potatisens näringsinlagring är näst intill klar. Förmodligen ger motåtgärden minskad skörd eftersom tillväxten avbryts. Det är viktigt att deponera den kontaminerade blasten på säkert ställe.

Om nedfallet sker vid T5 hamnar halten under gränsvärdet. Däremot finns en stor skillnad i halt beroende på hur långt innan skörd som nedfallet sker. Genom att skörda direkt efter ett nedfall kan halten minskas med två tredjedelar jämfört med om man väntar en dryg vecka innan potatisen skördas.

Om nedfallets storlek är 100 kBq ligger halterna i potatisen vid skörd över gränsvärdet. Enda undantaget är om nedfallet sker före sättnings eller innan plantan kommit upp (T0 - T1). Vid T2 ligger halten precis över det tillåtna värdet och här kan det vara aktuellt med någon motåtgärd för att få ner halten. Potatisblasten har precis kommit upp och befinner sig i utvecklingsstadium II, *stolonbildning*. I detta stadium kan det vara lämpligt att kapa av blasten och sedan låta ny blast växa ut. Som ovan nämnts ger nedfall under senare tidpunkter så höga halter i potatisen att motåtgärder inte är tillräckliga för att minska halten till under gränsvärdet. Nedfall i storleksordningen 1000 kBq ger halter över gränsvärdet för samtliga nedfallstidpunkter. Enda tillfället då motåtgärder kan få effekt är om nedfallet sker under tidpunkterna T0 och T1. Vid så tidigt utvecklingsstadium finns möjlighet att med hjälp av kaliumgödsling halvera halten radiocesium och därmed komma under gränsvärdet.

4.4 Felkällor

Vid genomförandet av undersökningarna år 1990 och 1991 användes samma försöksrutor. Detta innebar att det 1991 fanns kvar radiocesium i marken från året innan som kunde tas upp av plantan via rötterna. År 1992 skedde försöken till största delen på andra försöksrutor men även här har det tidigare år utförts försök med direktdeponering av ^{134}Cs i växande gröda (grönsaker). Eftersom försöken var tänkta att belysa effekten av ett nedfall i växande gröda är det inte bra att ha en resteffekt av ett ”nedfall” året innan. Detta kan ha påverkat resultatet (upptag från rötterna av det cesium som finns kvar i marken från tidigare års deponeringar) trots att ^{134}Cs har en relativt snabb halveringstid jämfört med ^{137}Cs .

5. Sammanfattande diskussion

Tidpunkten för nedfall och grödans utvecklingsstadium styr halten ^{134}Cs i den skördemogna potatisen. Ett nedfall under första delen av säsongen ger låga halter i den skördemogna potatisen och ju tidigare nedfallet sker, desto lägre blir halten. De högsta halterna uppkommer om nedfallet sker i mitten av säsongen. Efter deposition under andra delen av säsongen är halterna lägre igen och ju närmare skörd nedfallet sker desto lägre blir halten ^{134}Cs .

Vid tidiga nedfall sjunker ^{134}Cs -halten i potatisen under säsongen, medan den vid sena nedfall blir högre med tiden. Den initiala uppfångningen i blasten varierar med grödans utvecklingsstadium. Vid tidiga nedfall har blasten en liten uppfångning och på grund av tillväxt minskar halten i potatisen under säsongen genom utspädningseffekten. Efter sena nedfall har blasten en stor uppfångning och överföringen från blast till knöl är hög vilket gör att halterna istället ökar med tiden.

Vid måttliga nedfall på 10 kBq uppstår problem med för höga ^{134}Cs -halter i skördemogen potatis om nedfallet sker i mitten av säsongen. Genom att kaliumgödsla eller kapa av blasten direkt efter nedfall kan halterna minskas till tillåtet värde. Vid sena nedfall kan en tidigareläggning av skörden minska halten till en tredjedel av det ursprungliga. Nedfall på 100 kBq ger halter över gränsvärdet för alla tidpunkter med undantag för riktigt tidiga nedfall som under potatissättning och plantans uppkomst. Vid så stora nedfall som 1000 kBq överstigs gränsvärdet kraftigt för samtliga nedfallstidpunkter.

I framtida experiment bör man väga blast- och knölbiomassa för att kunna beräkna potatisens upptag vid olika tidpunkter och flöden mellan blast och knöl. Detta förenklar tolkningen av haltförändringar över säsongen och gör att man bättre förstår vad som sker.

6. Referenser

- Aarkrog, A. 1975. *Radionuclide levels in mature grain related to radio strontium content and time of direct contamination*. Health Physics 28, 557.
- Aarkrog, A. 1992. *Concept of seasonality in the light of the Chernobyl accident*. Analyst 117, 479 - 499.
- Alexandersson, H. & Eggertsson Karlström, C. 2001. *Temperaturen och nederbörden i Sverige 1961-1990*. Referensnormaler – utgåva 2. Norrköping.
- Andersson, P. 2007. *Strålmiljön i Sverige. SSI Rapport 2007:02*. Avdelningen för beredskap och miljöövervakning, Stockholm.
- Bodin, B. 1983. *Utvecklingsförlopp och kvalitetstablering hos potatis*. Institutionen för växtodling, Rapport 125, SLU, Uppsala.
- Bodin, B. & Svensson, B. 1996. *Potatis och potatisproduktion*. Institutionen för växtodlingslära, SLU, Uppsala.
- Eriksson, Å., Haak, E. & Rosén, K. 1998a. *Retention of simulated fallout nuclides in agricultural crops. I. Experiments on ley*. Department of Radioecology, Report SLU-REK-80. Uppsala.
- Eriksson, Å., Haak, E. & Rosén, K. 1998b. *Retention of simulated fallout nuclides in agricultural crops. II. Deposition of Cs and Sr on grain crops*. Department of Radioecology. Report SLU-REK-81, Uppsala.
- Fogelfors, H. 2001. *Växtproduktion i jordbruket*. Natur och Kultur/LTs förlag, Borås.
- FOI. 2002. *Livsmedelsproduktionen vid nedfall av radioaktiva ämnen*. Avdelningen för NBC-skydd, Totalförsvarets forskningsinstitut, Umeå, Jordbruksverket, Jönköping.
- Franic, Z., Petrinc, B., Marovic, G. & Franic, Z. 2007. *Radiocaesium activity concentrations in potatoes in Croatia after the Chernobyl accident and dose assessment*. Journal of Environmental Science and health Part b-Pesticides Food contaminants and Agricultural wastes 42 (2):211-217.
- Fredriksson, L. 1962. *En ny ramförsöksmetodik för jämförande studier av växternas upptagning av närsalter och fissionsprodukter under fältförhållanden*. Kungl. Lantbrukshögskolan och Statens Lantbruksförsök, Statens Jordbruksförsök, Meddelande Nr 136. Uppsala.
- Fredriksson, L., Lönsjö, H. & Eriksson, Å. 1969. *Studies on plant accumulation of fission products under Swedish conditions X. Absorption of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs from soil by vegetable crops*. Försvarets Forskningsanstalt, Avdelning 4. Stockholm.

Harris, P.M. (red.) 1978. *The potato crop: the scientific basis for improvement*. Chapman and Hall, London.

IAEA. 1994. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments*. Produced in collaboration with the International Union of Radioecologists. Technical Reports Series No. 364. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Johansson, K. J. 1996. *Strålning människan och miljön*. Institutionen för radioekologi, SLU, Uppsala.

Jordbruksstatistisk årsbok. 2007. Statistiska centralbyrån, Stockholm.

Knatko, V.A., Aageets, V.U. & Shmigelskaya, I.V. 2000. *Spatial modelling of transfer factor against ^{137}Cs in an area of Belarus; regression analysis of the transfer factor against ^{137}Cs deposition and soil characteristics*. Journal of Environmental Radioactivity 48 (2): 171-181.

Middleton, L.J. 1959. *Radioactive strontium and caesium in the edible parts of crop plants after foliar contamination*. Agricultural Research Council, Radiobiological Laboratory, Grove, Berks, and Field Station, Compton, Berks 387-402.

Moberg, L. 2001. *Kärnkraftsolyckan i Tjernobyl – en sammanfattning femton år efter olyckan*. SSI Rapport 2001:07.

Nisbet, A.F. & Shaw, S. 1994. *Summary of a five-year lysimeter study on the time dependent transfer of ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$ and ^{241}Am to crops from three contrasting soil types. 2 Distributions between different plant parts*. Journal of Environmental Radioactivity 23: 171-187.

Rosén, K. 1996. *Field studies on the behaviour of radiocaesium in agricultural environments after the Chernobyl accident*. Doktorsavhandling. Rapport SLU REK 78, Institutionen för radioekologi, SLU, Uppsala.

Rosén, K. & Eriksson, J. 2007. *Motåtgärder i växtodlingen efter ett nedfall av radioaktivt cesium vid olika nedfallsnivåer och årstider*. Manuskript, SLU, Uppsala.

Rosén, K., Eriksson, Å. & Haak, E. 1996. *Transfer of radiocaesium in sensitive agricultural environments after the Chernobyl accident in Sweden. I. County of Gävleborg*. Science of the Total Environment 182: 117-133.

Rosén, K. & Haak, E. 2006. *Resursbehov för motåtgärder och sanering vid kärnenergiolyckor i svenskt jordbruk*. Räddningsverket, Karlstad.

Strandberg, M. 1994. *Contamination of annual crops*, s. 185-195. I: *Nordic Radioecology. The transfer of radionuclides through nordic ecosystems to man*. Red. Dahlgaard, H. Studies in Environmental Science 62. Elsevier, Amsterdam.

Van der Perk, M., Lev, T., Gillett, A.G., Absalom, J.P., Burrough, P.A., Crout, N.M.J., Garger, E.K., Semiochkina, N., Stephanishin, Y.V. & Voigt, G. 2000. *Spatial modelling of transfer of long-lived radionuclides from soil to agricultural products in the Chernigov region, Ukraine*. Ecological Modelling 128: 35-50.

Åhman, B. 2005. *Utveckling, övervakning och åtgärder när det gäller radioaktivt cesium i renar efter Tjernobylyckykan*. SSI Rapport 2005:17.

Internet

Axfood, www.axfood.se

Fakta om potatisen (2007-05-21)

<http://www.axfood.se/showdoc.asp?docname=output%20pressrelease&docfolderid=16&foldeid=59&channeltypeid=4&channelpubid=3&channelitemid=439960&setlanguageid=1>

Manitoba agriculture, <http://www.gov.mb.ca>

Commercial potato production - Botany of the potato plant (2007-06-18)

www.gov.mb.ca/agriculture/crops/potatoes/bda04s02.html

NE, Nationalencyklopedin, <http://www.ne.se> (2007-05-21)

SJV, Jordbruksverket, www.sjv.se

Ansökan om genetiskt modifierad stärkelsepotatis som har lämnats in i Sverige (2007-07-13)

<http://www.sjv.se/amnesomraden/vaxtmiljovatten/genmodifieradevaxter/kommersiellanvandning/svenskansokanompotatis.4.1f6043010ea2e7675180002240.html>

SKI, Statens kärnkraftsinspektion, www.ski.se

Frågor om kärnkraft (2007-07-10)

<http://www.ski.se/page/2/16/html?18700#1>

Personliga kommentarer

Eriksson, Åke, Universitetslektor, f.d. Institutionen för radioekologi, SLU, Uppsala (2007-10-15).