

Spridning av bekämpningsmedel i banvall - Modellutveckling och känslighetsanalys

Pesticide in railway embankments -
Model development and sensitivity analysis

Erica Peters

REFERAT

Spridning av bekämpningsmedel i banvall-Modellutveckling och känslighetsanalys

Erica Peters

En järnvägsbanvalls främsta syfte är att vara en stabil grund för att tåg säkert ska kunna passera. Ogräs ska inte ges möjlighet att få fäste och vatten som tillkommer banvallen ska lätt kunna dräneras bort, allt för att behålla banvallens stabilitet. Även ur säkerhetssynpunkt måste banvallar hållas fria från ogräs då dessa kan skymma sikten för lokförare samt dölja eventuella brister på rälsen. Sverige har cirka 12 000 kilometer järnväg och på 25–30 % av dessa utförs årligen ogräsbekämpning. Trafikverket som förvaltar majoriteten av Sveriges järnvägar, använder i dagsläget det kemiska bekämpningsmedlet Roundup Bio för bekämpning av ogräs på banvallar. För att förhindra spridning till känsliga akvatiska ekosystem är det av största vikt att veta hur dessa herbicider sprids och påverkar omkringliggande miljöer.

I detta examensarbete har en spridningsmodell för bekämpningsmedel i mjukvaran GoldSim vidareutvecklats, optimerats och känslighetstestats. Även en scenarioanalys med så kallade ”worst-case”-simuleringar har utförts på modellen. De bekämpningsmedel som modellen har kalibrerats efter är preparaten Arsenal 250 samt Roundup Bio. Arsenal 250 innehåller den aktiva substansen imazapyr och användes på banvallar mellan åren 1995 och 2004. Roundup Bio innehåller den aktiva substansen glyfosat med dess nedbrytningsprodukt AMPA och är den herbicid som används i dagsläget.

Resultaten från simuleringsförsöken med imazapyr visade att spridningsmodellen stämmer bra överens med uppmätta värden av imazapyr i banvallen. I grundvattnet stämmer ej simulerade värden jämfört med uppmätta halter. Glyfosatsimuleringarna påvisar mycket små mängder herbicider i banvall samt i grundvattnet. Känslighetstestet visade att de känsligaste parametrarna i modellen för simulerade mängder herbicid i banvallen är halveringstid samt Kd-värde. För simulerade koncentrationer av imazapyr i grundvattnet är avståndet till grundvattenytan den mest känsliga parametern, liksom Kd-värdet i banvallen, halveringstiden och nederbörden. Scenarioanalysen bekräftade teorin om att ett litet avstånd till grundvattenytan, ett lågt Kd-värde i banvallen samt en lång halveringstid ger en ökad koncentration av kemikalier i grundvattnet.

Sammanfattningsvis kan nämnas att simuleringsmodellen generellt fungerar bra med imazapyr. För simulering av glyfosat och dess nedbrytningsprodukt AMPA krävs det dock mer arbete med modellen för att Trafikverket ska kunna använda den i framtiden.

Nyckelord: Banvall, imazapyr, glyfosat, AMPA, GoldSim, känslighetsanalys

*Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten och landskaplära. Uppsala Universitet.
Geocentrum, Villavägen 16, SE 752 36 Uppsala.
ISSN 1401-5765*

ABSTRACT

Pesticide in railway embankments - Model development and sensitivity analysis

Erica Peters

The stability of railway embankment is essential for safe transport. In order to ensure safe transport, water should be allowed to freely drain. Furthermore, as the engine driver has to be able to see signs, and people working on the embankment are supposed to easily see flaws on the rails to ensure safety for the passing trains, plants should not be allowed to grow on the embankment. In Sweden there are 12 000 kilometers of railway tracks and 25–30 % of them are treated for weed control every year. The Swedish Transport Administration is currently using the pesticide “Roundup Bio” to remove weeds on the embankment. To prevent the dispersal of chemicals to sensitive ecosystems, chemical transport has to be investigated carefully.

In this master thesis a transport model for the transport of pesticides has been simulated using the software “GoldSim”. The model have been developed, optimized and controlled by a sensitivity analysis. In addition to this an analysis of worst case scenarios has been tested. The pesticides “Arsenal 250” with the active substance imazapyr and “Roundup Bio” with the active substance glyphosate have been used in the calibrating of the model.

The transport model for imazapyr shows a good estimation of the mass of herbicides in the embankment compared to measurements. There is also a good estimation in the groundwater even if the concentration at the beginning of the simulation period is underestimated. The simulation with glyphosate, on the other hand, showed very small quantities of both glyphosate and its degradation product AMPA (aminomethylphosphateacid) in both the embankment and in the groundwater. The sensitivity test showed that the parameter *half-life* and *Kd-value* (adsorption capacity) were the most sensitive parameters in the model. When it comes to the concentration in the groundwater the *distance to the groundwater level* was the most sensitive parameter, as well as the *Kd-value* in the embankment, the *half-life* and the *precipitation*. As expected, the worst-case analysis showed that a small distance to the groundwater level, a low *Kd-value* and a short *half-life* produced even larger concentrations of herbicides in the groundwater.

In conclusion it should be mentioned that the stimulation model generally works well in regards to with imazapyr. For stimulation of glyphosate and its metabolite AMPA more work with the model is required for the Swedish Transport Administration to apply it in the future.

Keywords: Railway embankment, imazapyr, glyphosate, AMPA, transport model, GoldSim, sensitivity analysis

*Department of Earth science, Air, water and Landscape science, Uppsala University.
Villavägen 16, SE 752 36 Uppsala
ISSN 1401-5765*

FÖRORD

Detta examensarbete är en del av civilingenjörsutbildningen i Miljö - och vattenteknik på Uppsala Universitet och omfattar 30 hp vilket motsvarar 20 veckor.

Examensarbetet har utförts på Vectura Consulting AB på uppdrag av Trafikverket.

Handledare	Erik Jonsson, Vectura Consulting AB
Ämnesgranskare	Roger Herbert, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet
Examinator	Allan Rodhe, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet

Jag vill tacka alla underbara människor som hjälpt och stöttat mig under denna vår. Ett stort tack till Josef, syster Jessica, Mamma och Pappa, moster Karin, kusin Kim, WEx Upp!, Erik Jonsson, Roger Herbert, personalen på Vectura-kontoret (speciellt ”pappa” Gustav), mina favorittjejer, Håkan, Jonas Forsman och Harald Cederlund.

”As we know, there are known knowns, there are things that we know we know. We also know there are known unknowns, that is to say, we know there are some things we do not know. But there are also unknown unknowns, the ones we don’t know we don’t know” – Donald Rumsfeld, former US Secretary of Defense, February 12th 2002.

Uppsala, juni 2012

Erica Peters

Erica Peters

*Copyright © Erica Peters och Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala Universitet. UPTEC W 12 014, ISSN 1401-5765
Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala Universitet,
Uppsala 2012*

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Hur bekämpningsmedel sprider sig i järnvägsbanvallar ner till grundvattnet

Erica Peters

Från ett tågfenster tittar du säkert ofta ut över Sveriges vackra landskap. Sjöar, älvar, ängar och skogar passerar förbi, men på banvallen finns ingenting som växer. Du kanske undrar vad det beror på?

I Sverige finns 12 000 km järnväg. Vissa sträckor består av nyare banvallar med material som ger god stabilitet och bra dräneringsegenskaper. Andra sträckor utgörs av äldre banvallar där materialet i konstruktionen tagits från platsen, vilket gör att den kan innehålla allt från bergmaterial till kolaska. Till skillnad från makadammet, som finns på nyare banvallar, har växter lätt för att få fäste i dessa heterogena miljöer med avseende på banvallssammansättning. Då ogräs är en säkerhetsrisk både för banvallens stabilitet och för tågets passage måste det oönskade ogräset bekämpas. Trafikverket har genom åren använt en rad olika bekämpningsmedel, alla med varierade bra och dåliga effekter. I dagsläget används bekämpningsmedlet Roundup Bio, en herbicid som även används inom jordbruket och i parker. Då järnvägar ofta kantas av vattendrag, dricksvattenbrunnar och viktiga ekosystem är det av största vikt att medlet som tillförs på banvallarna inte sprids vidare till dessa känsliga miljöer utan istället stannar och bryts ned i banvallen.

För att få kännedom om hur bekämpningsmedel sprider sig i banvallsmiljöer har en simuleringsmodell skapats av konsultföretaget Golder Associates AB (Golder) och sedan utvecklats vidare av Vectura Consulting AB (Vectura). Mjukvaran som modellen är uppbyggd i heter GoldSim och används bland annat i USA för säkerhetsanalys av planerad slutdeponering av kärnbränsle. Trafikverkets förhoppning är att de ska kunna använda modellen för att simulera vad som händer vid byte av bekämpningsmedel eller vid besprutning av en ny miljö.

I detta examensarbete har uppgiften varit att titta närmre på denna simuleringsmodell, utvärdera den samt göra den bättre. Modellen har kalibrerats mot tidigare uppmätta värden av den aktiva substansen imazapyr som finns i det bekämpningsmedel som Trafikverket använde mellan åren 1995 och 2004, nämligen Arsenal 250. Detta då det finns fler mätdata för det ämnet än vad det finns för den aktiva substansen glyfosat som finns i Roundup bio, som endast använts i några år.

För att ta reda på vilka parametrar som är särskilt känsliga och därmed ger stort utslag på koncentrationsbestämningen i banvallen och i grundvattnet har en känslighetsanalys gjorts på modellen.

Simuleringar visar att simuleringsresultaten stämmer väl överens med uppmätta värden för massan imazapyr i banvallen. I grundvattnet visar dock modellen på bra uppskattningar av imazapyrkoncentrationer endast i slutet av simuleringsperioden.

Efter känslighetsanalysen har det kunnat konstateras att *Kd-värdet* och *halveringstiden* är de känsligaste parametrarna i modellen. *Kd-värdet* är en fördelningskoefficient och beskriver hur mycket av bekämpningsmedlet som fastnar på bankmaterialet och hur

mycket som stannar i marklösningen, alltså vattnet som rör sig genom banvallen till grundvattnet. Parametern *avstånd till grundvattenytan* är den viktigaste parametern att ta hänsyn till för att få bra uppskattningar av imazapyrhalter i grundvattnet. Även *Kd-värdet* i banvallen, *halveringstiden* och *nederbörden* är viktiga att ta hänsyn till.

Eftersom Trafikverket i dagsläget använder Roundup Bio på banvallarna har simuleringsmodellen även anpassats efter detta bekämpningsmedel. Skillnaden mellan denna modelluppställning och modelluppställningen med imazapyr är att det endast finns uppmätta värden att jämföra med från grundvattnet. Detta medför att ingen säker slutsats kan dras huruvida modellen stämmer eller inte. Modellen överensstämmer dock med genomförda fältundersökningar som visat att det är svårt att hitta halter av glyfosat och även dess nedbrytningsprodukt AMPA i grundvattnet.

Sammanfattningsvis kan nämnas att simuleringsmodellen generellt fungerar bra med imazapyr. För simulering av glyfosat och dess nedbrytningsprodukt AMPA krävs det dock mer arbete med modellen för att Trafikverket ska kunna använda modellen i framtiden. För att kunna göra det behövs vidare provtagningar för glyfosat och AMPA för att kunna kalibrera modellen ytterligare. Vid val av ny besprutningsplats eller val av nytt bekämpningsmedel bör särskild hänsyn tas till *avståndet till grundvattenytan*, *Kd-värdet* samt *halveringstiden*.

ORDLISTA OCH FÖRKORTNINGAR

Adsorption	När ett fast ämne binder ett ämne från en vätska eller en gas.
Akvifär	Geologisk bildning som kan lagra grundvatten som är utvinningsbart.
AMPA	Aminometylfosforsyra, nedbrytningsprodukt från glyfosat.
Arsenal 250	Kemiskt ogräsbekämpningsmedel som användes av Trafikverket på järnvägsbanvallar mellan åren 1995 och 2004.
Ballast	Stenmaterial såsom sand, grus och sten. Används som fyllnadsmaterial i järnvägsbanvallar.
Bankfyllning	Den fyllning som är under makadammet på en järnvägsbanvall.
Diffusion	Transportprocess som drivs av koncentrationsgradienter.
Diffusivitet	Diffusionsprocessen i ett medium, t ex i marken.
Effektiv porositet	Volymandel av de hålrum som finns i marken som är tillgängliga för vattenströmning.
Glyfosat	Den aktiva substansen som finns i bekämpningsmedlet Roundup Bio.
Herbucid	Samlingsnamn för kemiska bekämpningsmedel som används för att bekämpa växter.
Hydrolys	Kemisk reaktion där en bindning klyvs genom en reaktion med vatten.
Imazapyr	Den aktiva substansen som finns i bekämpningsmedlet Arsenal 250.
K_d	Fördelningskoefficient som beskriver adsorption av ett löst ämne till fast material, t ex partiklar.
K_{OC}	Fördelning som beskriver tillgången till organiskt kol.
Log K_{OW}	Fördelning som beskriver bioackumuleringsförmågan i växter.
Makadam	Krossad sten, används som underlag till järnvägsspår.

Metabolit	En nedbrytningsprodukt som bildas då ett ämne genomgått en kemisk reaktion.
Monte Carlo simulering	En statistisk metod där det sker en slumpvis upprepning av data för att beräkna fram ett resultat.
Percentil	Beskrivning av spridningen i en fördelning.
Persistenstid	Nedbrytningstid.
Roundup Bio	Kemiskt bekämpningsmedel som används av Trafikverket på järnvägsbanvallar.
Stokastisk	Slumpmässig.
$t_{1/2}$	Halveringstid. Den tid det tar för ett ämne att halvera sin koncentration (med t ex hänsyn till nedbrytning).
Vattenhalt	Kvoten mellan vattenvolymen och jordvolymen.
Vätmedel	Ämne som sänker ytspänningen hos en vätska. Används tillsammans med kemiskt bekämpningsmedel och vatten, för att medlet ska komma i ”närmre kontakt” med växten.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	INLEDNING	1
1.1	SYFTE OCH MÅLSÄTTNING.....	2
1.2	AVGRÄNSNING	2
1.3	DISPOSITION	2
2.	BAKGRUND.....	3
2.1	ANVÄNDNING AV OGRÄSMEDEL	3
2.2	TIDIGARE STUDIER.....	3
2.3	BANVALLENS UPPBYGGNAD	5
2.3.1	Äldre banvall	5
2.3.2	Nyare banvall.....	6
2.4	KEMISK OGRÄSBEKÄMPNING.....	6
2.4.1	Allmänt.....	6
2.4.2	Historik.....	7
2.4.3	Spridningsteknik och försiktighetsåtgärder	7
2.4.4	Spridningsvägar och spridningsprocesser	10
2.4.5	Arsenal 250 - Imazapyr	13
2.4.6	Roundup Bio - Glyfosat	13
2.4.7	Miljömål.....	14
2.4.8	Lagstiftning.....	15
3.	MATERIAL OCH METODER	16
3.1	STUDIEOMRÅDEN OCH TYPMILJÖER.....	16
3.1.1	Studieområde för imazapyr	16
3.1.2	Studieområde för glyfosat	16
3.2	PROVTAGNING OCH DATA.....	17
3.2.1	Provdatabeskrivning för imazapyr från provplatsen Ina	17
3.2.2	Provdatabeskrivning för glyfosat vid provplatserna Skörpinge, Hasselfors och Lunda.....	20
3.3	PROBLEMSTÄLLNING	23
3.3.1	Simulering med imazapyr.....	23
3.3.2	Simulering med glyfosat	23
3.4	PROGRAMBESKRIVNING	23
3.4.1	GoldSim	24
3.5	SPRIDNINGSMODELLENS UPPBYGGNAD	25
3.5.1	Konceptuell modell och geometri.....	25

3.5.2	Modellparametrisering, imazapyr	27
3.5.3	Modellparametrisering, glyfosat	28
3.5.4	Nederbörd och temperatur	30
3.5.5	Antaganden	30
3.5.6	Sannolikhetsbaserad metodik	30
3.6	KÄNSLIGHETSANALYS AV IMAZAPYRMODELL	31
3.7	OPTIMERING AV IMAZAPYRMODELLEN	31
3.8	EFFEKTIVITETSTEST AV IMAZAPYRMODELL	31
3.9	STATISTISKT BEARBETNING AV IMAZAPYRMODELL	32
4.	RESULTAT	33
4.1	MODELLUPPBYGGNAD OCH MODELLUTVECKLING AV IMAZAPYRMODELL	33
4.2	SIMULERING MED IMAZAPYR	34
4.3	ANALYSER AV IMAZAPYRMODELL	39
4.3.1	Känslighetsanalys av imazapyrmodell	39
4.3.2	Optimering av imazapyrmodell	42
4.3.3	Effektivitetstest på imazapyrmodell	42
4.3.4	Statistisk bearbetning av imazapyrmodell	43
4.4	MODELLUPPBYGGNAD OCH MODELLUTVECKLING AV GLYFOSATMODELL	44
4.5	SIMULERING MED GLYFOSAT	46
4.5.1	Simuleringar av glyfosat vid olika scenarier	51
5.	DISKUSSION	53
5.1	SIMULERING MED IMAZAPYR	53
5.2	ANALYSER AV IMAZAPYRMODELL	54
5.3	SIMULERING MED GLYFOSAT	54
5.4	FÖRSLAG TILL FORTSATTA STUDIER	57
6.	SLUTSATSER	58
7.	REFERENSER	59
	BILAGA A – TYPMILJÖER FÖR DE OLIKA PROVPLATSERNA	64
	BILAGA B – TVÄRSEKTION ÖVER BANVALL VID INA	65
	BILAGA C – UPPBYGGNAD IMAZAPYRMODELL	66
	BILAGA D – RESULTAT IMAZAPYRMODELL	70
	BILAGA E – KÄNSLIGHETSANALYS, IMAZAPYRMODELL	76
	BILAGA F – RESULTAT GLYFOSATMODELL	78

1. INLEDNING

Det är av största vikt att banvallar och bangårdar hålls fria från växtlighet för att människor och gods ska kunna färdas säkert på järnvägarna. För att hålla en hög spårkvalitet måste växtligheten minimeras och ogräs tas bort. Växter och växtrester kan täppa igen håligheter i makadammet eller gruset på banvallen som i vanliga fall ska dränera den, och på så sätt göra att vatten stannar kvar. Detta leder till en instabil banvall och en sämre spårkvalitet. På vintern utgör detta speciellt en stor fara då en vattenfylld banvall kan frysa och på så sätt flytta delar av banvallen, så kallad tjällyftning (Almqvist, 2004). Ogräs gör det även svårt för personalen som jobbar vid banvallar och på bangårdar att se eventuella skador och brister på rälsen (Torstensson, 2004). Det är också av största vikt att lokförare ser arbetande personal på spåret samt trafikskyltar (Trafikverket, 2010a). Halt ogräs på spåren kan leda till att hjulen slirar och accelerations- och bromssträckor blir längre. Torrt gräs leder till ökad risk för brand då hjulen kan skapa gnistor och tända eld på gräset, vilket innebär en säkerhetsrisk (Almqvist, 2004). Att bekämpa ogräset är en säkerhetsfråga, att det sker på rätt sätt är en miljöfråga.

I dagsläget använder Trafikverket nästan uteslutande det kemiska bekämpningsmedlet Roundup Bio, som innehåller ämnet glyfosat, för bekämpning av ogräs på banvallar och bangårdar (Vectura, 2011a). Besprutningen sker vanligtvis i maj eller juni varje år (Vectura, 2012a) och Trafikverket följer då gällande lagar och föreskrifter för applikation (Trafikverket, 2012e). Då kemiska bekämpningsmedel är giftiga och kan orsaka långvarig negativ skada vid för stor användning är det av stor vikt att veta hur dessa sprids och hur påverkan på bland annat akvatiska ekosystem, dricksvattenförsörjningen och växtligheten i nära anslutning till banvallen kan minimeras (Trafikverket, 2012b).

Flera försök som gjorts av Sveriges Lantbruksuniversitet har visat att det finns en potential till att herbicider kan läcka till grundvattnet, oftast då den applicerade mängden är stor. Även banvallens uppbyggnad av grovt material, så kallat makadam, som har ett lågt innehåll av organiskt material, kan vara en bidragande orsak till att de applicerade herbiciderna kan transporteras nedåt och kontaminera grundvattnet (Cederlund m.fl., 2004). Det kan i sin tur leda till att gränsvärdet i dricksvattenkvaliteten, på 0,1 µg/l (Livsmedelsverket, 2001) överskrids.

En transportmodell som visar hur ogräsbekämpningsmedel sprids i banvallar och vidare ner i grundvattnet har utvecklats av Golder Associates AB (Golder) (Golder, 2008) och senare Vectura Consulting AB (Vectura) (Vectura, 2011a; Vectura, 2011b) i simuleringssystemet GoldSim (www.goldsim.com). För att kalibrera modellen har simulerade resultat jämförts med uppmätta halter av imazapyr som är den aktiva substansen i bekämpningsmedlet Arsenal 250 (Vectura, 2011b). Spridningsmodellen är en grov massbalansmodell och ska ge en ökad förståelse av vad det är som styr adsorption, persistens (nedbrytning) och transport av bekämpningsmedlen genom banvallen till grundvattnet. Modellen beskrivs mer ingående i kommande kapitel.

Trafikverket vill ha tillgång till ett modellverktyg som kan simulera processer som påverkar spridning av olika bekämpningsmedel i olika typer av banvallstyper och olika omgivningar (Vectura, 2011a). Därför ska den befintliga spridningsmodellen utvecklas och testas statistiskt genom en känslighetsanalys. Analysen görs med hjälp av data från bekämpningsmedlet Arsenal 250 med den aktiva substansen imazapyr men ska sedan justeras för bekämpningsmedlet Roundup Bio med den aktiva substansen glyfosat då det är detta medel Trafikverket använder i dagsläget.

1.1 SYFTE OCH MÅLSÄTTNING

Syftet med detta examensarbete är att utveckla en befintlig spridningsmodell genom att undersöka vilka kemiska och fysikaliska parametrar som har störst inverkan på spridningen av olika kemiska bekämpningsmedel i marken och att kalibrera modellen mot observerade halter av bekämpningsmedlet imazapyr. Efter genomförd analys ska användaren veta vilka parametrar som är känsliga i modellen och på så sätt påverkar slutresultatet.

Målet med projektet är att utveckla ett modellverktyg som kan påvisa hur bekämpningsmedel sprider sig i banvallar för olika banvallstyper och olika omgivningar. Projektet består av följande delmål:

- Utveckla befintlig spridningsmodell.
- Öka användarvänligheten för praktisk användning
- Göra en känslighetsanalys på befintlig spridningsmodell med hjälp av det kemiska ogräsbekämpningsmedlet Arsenal– 250 med den aktiva substansen imazapyr.
- Göra simuleringar i befintlig spridningsmodell med det kemiska ogräsbekämpningsmedlet Roundup Bio med den aktiva substansen glyfosat.

1.2 AVGRÄNSNING

Examensarbetets avgränsningar har främst varit modellens begränsningar då simuleringsmodellen beskriver grundläggande transportprocesser och använder en robust sannolikhetsbaserad metodik. De aktiva substanserna som har använts i modellen är imazapyr och glyfosat. Modellkalibrering har skett endast med avseende på parametrarna *avstånd till grundvattenyta*, *partikelproduktion*, *grundvattenvolymen*, *nederbörd*, *dos aktiv substans*, *Kd-värde* i banvall samt *halveringstid*. De typmiljöer som har använts i scenarioanalysen ("worst-case"-simuleringarna) har begränsats till en ändring av parametrarna *avstånd till grundvattentytan*, *Kd-värde* samt *halveringstid*. Teoridelen har begränsats till de aktuella ämnena imazapyr och glyfosat.

1.3 DISPOSITION

Examensarbetet är uppdelat i två delar, en teoridel och en simuleringsdel. Teoridelen återfinns i kapitel 2. Studier av litteratur till teoridelen har gjorts för att få kunskap om kemiska bekämpningsmedel, gällande lagar, spridningsmetoder, spridningsvägar samt hur den befintliga spridningsmodellen fungerar. I simuleringsdelen har simuleringar gjorts med imazapyr och glyfosat. Metoder och material finns i kapitel 3 och resultat i kapitel 4. I kapitel 5 förs diskussioner av resultaten och i kapitel 6 finns slutsatser.

2. BAKGRUND

2.1 ANVÄNDNING AV OGRÄSMEDEL

I dagsläget utförs årligen ogräsbekämpning på 25–30 % av Sveriges 12 000 kilometer långa järnvägar (Torstensson, 2001; Trafikverket, 2012g). Metoden som används är nästan uteslutande kemisk ogräsbehandling. Andra metoder som mekanisk röjning eller termisk behandling är både tidskrävande men också i jämförelse med kemisk behandling betydligt mer kostnadskrävande. De sträckor som inte tillåter kemiska medel såsom sträckor över vattentäkter eller vattendrag behandlas dock med alternativa metoder på grund av miljöaspekterna. Forskning om nya metoder och nya, mindre farliga, preparat pågår ständigt i ett nära samarbete med Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU). Harald Cederlund (Trafikverket, 2010a), forskare inom mikrobiologi på SLU, menar att vilket preparat som används är en avvägning av hur effektivt det är och hur det uppträder i banvallen. Preparatet måste brytas ned tillräckligt snabbt och det får inte vara för rörligt så att det når grundvattnet. Arbete med att hitta ett preparat som har rätt egenskaper vad gäller både effekt och miljö pågår fortlöpande (Trafikverket, 2010a).

Preparaten som Trafikverket använder är godkända av kemikalieinspektionen och själva besprutningen följer Naturvårdsverkets anvisningar. Ett specialdesignat ogräståg har utvecklats i samarbete med SLU där besprutningsmetoden innebär att en begränsad andel bekämpningsmedel används och bara där det behövs. I dagsläget används det kemiska bekämpningsmedlet Roundup Bio med den aktiva substansen glyfosat. Glyfosat är biologiskt nedbrytbart och används även inom jordbruket (Trafikverket, 2010a). Glyfosat uppför sig annorlunda i banvallsmiljö jämfört med vad det gör på jordbruksmark då banvallen har lägre innehåll av lera och organiskt material vilket normalt sett innebär färre mikroorganismer som kan bryta ned preparatet. Det betyder att föroreningen blir mer mobil samt att nedbrytningshastigheten minskar (Torstensson, 2001). På grund av detta har SLU gjort studier av medlet i banvallsmiljö samtidigt som ett miljökontrollprogram har utförts av Trafikverket sedan 2007 där man tagit grundvattenprover och jordprover på vissa utvalda ställen runt om i landet. Provplatserna har valts ut för att representera olika typmiljöer, se bilaga A (Vectura, 2011a).

Genom att använda ren makadam i banvallarna får ogräset svårt att få fäste. I äldre banvallar finns mer finkornigt material som gör att växter kan få fäste (detta diskuteras mer i kommande kapitel). I och med att nya järnvägar byggs och äldre rustas upp minskar därför på lång sikt behovet av ogräsbekämpning (Trafikverket, 2010a).

2.2 TIDIGARE STUDIER

Omfattande studier av hur olika kemiska bekämpningsmedel sprider sig i banvallar har utförts på SLU. Börjesson m.fl., (2004) beskriver hur bekämpningsmedlet imazapyr sprids i svenska järnvägsbanvallar. Studien visar tre faktorer som anses viktiga för spridningen av imazapyr i banvallar till grundvattnet; tillgången på ett lager av organiskt material i jordprofilen, jordens pH och applicerad dos imazapyr. Alltså kan miljöriskerna minimeras vid mindre doser samt vid införande av adsorptionslager i

banvallen under byggnation. Cederlund m.fl. (2004) menar att en minskad dos herbicider på banvallen kan minska spridningen. Vid låg mikrobiologisk aktivitet, på grund av liten ackumulering av organiskt material på banvallarna, minskar den biologiska nedbrytningen av medlet.

Hur den aktiva substansen glyfosat beter sig på banvallar presenterades i en rapport av Torstensson m.fl. (2005). Genom tester gjorda mellan 1984 och 2003 visade det sig att 5 liter bekämpningsmedel per hektar är en lagom dos för effektiv bekämpning. Det visade sig även att det mesta av glyfosats nedbrytningsprodukt AMPA (aminometylfosforsyra) återfanns 30 cm ner i marken. Dock rekommenderas en maximal dos på 3 liter Roundup Bio per hektar för att förhindra förorening av grundvattnet. Andra slutsatser var att herbicidernas rörlighet i banvallar inte kan jämföras med hur de rör sig i jordbruksmark, att även om de testade herbiciderna normalt inte tog sig längre ner än 30 cm ner i makadammet på banvallen, betyder inte det att starkt adsorberande herbicider inte kan ta sig ännu längre ner i profilen genom partikeltransport eller preferentiella flödesvägar (flöden genom grova kanaler i marken). Studierna visade även att glyfosat är starkt adsorberande i banvallar. Även Jarvis m.fl. (2006) rapporterar om vikten av partikelbunden transport.

2005 gjordes en förstudie, av konsultföretaget Sweco, om möjligheten att ta fram ett miljökontrollprogram för användning av kemiskt ogräsbekämpningsmedel på Sveriges järnvägar. Beställningen av en förstudie gjordes av dåvarande Banverket. Parallellt med förstudien gjordes också ett examensarbete på SLU för att ta fram ett förslag på ett verktyg i form av en spridningsmodell i programvaran PowerSim (www.powersim.com). Detta verktyg hade utvecklats i syfte att vara ett stöd till riskbedömningen avseende spridning av kemiska bekämpningsmedel från banvallar till grundvattnet. Data till modellen användes från två olika provpunkter längs med järnvägen i Ina, strax väster om Söderhamn. Utifrån simuleringsresultaten från PowerSim-modellen drogs slutsatsen att partikelbunden transport är av stor vikt för hur stor mängd herbicider som transporteras genom banvallen (Almqvist, 2004).

I enlighet med förstudien och en omfattande inventering av järnvägsbanvallar runt om i Sverige 2006 för att hitta lämpliga provtagningsplatser, påbörjades 2007 ett rikstäckande miljökontrollprogram. Programmets syfte är att få ett bättre grepp om användningen av kemiska bekämpningsmedel på banvallar. Mellan åren 2007 och 2010 samlades grundvattenprover in med olika tidsintervall efter besprutningen med Roundup Bio. Sammanfattningsvis påträffades glyfosat eller AMPA i 17 av de totalt 289 analyserade grundvattenproverna, och då i uppmätta halter mellan 0,1 och 0,4 µg/l (gränsen för dricksvatten är 0,1 µg/l enligt Livsmedelsverket, 2001). 12 av dessa 17 prover återfanns på provplatsen Skörpinge utanför Ängelholm, där de uppmätta halterna av glyfosat eller AMPA inte avvek från halter i grundvattnet i närliggande jordbruksmarker där troligtvis Roundup Bio används. De resterande fyra proverna med uppmätta halter återfanns på provplatsen Hasselfors och där kunde förekomsten endast härledas till besprutningen av järnvägen (Vectura, 2011a). Även ett prov från Lunda påvisade glyfosathalter i grundvattnet.

Cederlund m.fl. (2008) har konstaterat att miljön i banvallar inte är optimal för mikroorganismer, eftersom banvallar har för låg halt av organiskt material. Det konstaterades också att det är svårt att förutse miljökonsekvenserna för herbicider i banvallar.

Bergström m.fl. (2010) menar att AMPA bryts ned snabbare än glyfosat, speciellt i jordar med hög andel lera. Trots frekventa regn visade studierna på att resterna (glyfosat och AMPA) till största del var lokaliserade i det översta jordlagret. Detta indikerar på att mobiliteten är relativt låg.

Den befintliga simuleringsmodell som stått till grund för detta examensarbete presenterades 2011 i en rapport av Vectura Consulting AB (Vectura, 2011b). Modellen som gjorts i mjukvaran GoldSim visar jämförelser mellan simuleringsresultat och observerade halter av imazapyr. Slutsatsen i rapporten där modellen presenterades var att en kombination av fältförsöken och simuleringar i modellen ger en ökad förståelse för transportprocesserna i banvallen. Dock konstaterades att en vidare statistisk analys bör göras på modellen för att få insikt i vilka parametrar det är som styr och som ger den bästa anpassningen till uppmätta halter imazapyr från fältförsöken.

2.3 BANVALLENS UPPBYGGNAD

Det är av största vikt att banvallskonstruktionen främjar stabilitet och har en bra hållfasthet för att garantera säkerheten för passerande tåg (Trafikverket, 2010b). När Trafikverket talar om en banvall delas den upp i en *närzon* och i en *fjärrzon*. Närzonen består av själva järnvägen och då också de preparerade markytorna och de områden som ligger nära själva banvallen. Närzonen tillhör själva järnvägsanläggningen och anses därför inte behöva samma höga krav och regler som områdena utanför. I fjärrzonen ingår den naturliga miljön som finns omkring närzonen. Olika hydrogeologiska typmiljöer kan beskriva platsens geologiska uppbyggnad, vattenflödesegenskaper samt föroreningstransport (Vectura, 2011a).

Mellan åren 1850 till 1920 byggdes de flesta av Sveriges järnvägar vilket innebär att majoriteten av banvallarna är av äldre modell (Almqvist, 2004). Äldre och nyare järnvägsbanvallar skiljer sig åt till viss del i konstruktionen vilket har betydelse för hur kemiska bekämpningsmedel transporteras i dem (Cederlund m.fl., 2008). Generellt består en nyare banvall av två till tre lager, alla med olika egenskaper för att försvåra spridning av föroreningar men samtidigt se till att vatten dräneras bort och småpartiklar inte fastnar, då detta kan ge upphov till att växter får fäste. Den största skillnaden mellan en gammal och en ny banvall är underballasten, som hos en ny banvall är mer homogen och hos en gammal är heterogen om den ens existerar (Vectura, 2011a). Nedan beskrivs äldre och nyare banvall mer i detalj.

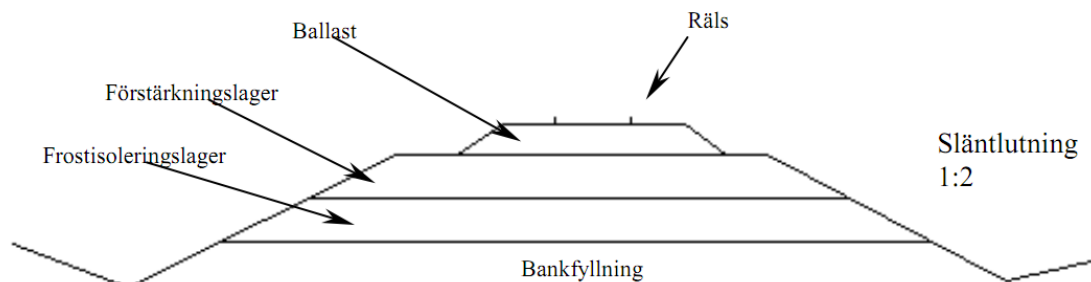
2.3.1 Äldre banvall

Äldre banvallar kan skilja sig markant från varandra och ha stora lokala skillnader i konstruktion och material. Platsens förutsättningar har oftast legat till grund för själva utformningen av banvallen vilket gör att det inte går att exakt beskriva en typisk uppbyggnad av en äldre banvall. Dock kan sägas att banvallens ballast består av

makadam och att mäktigheten på detta lager varierar men oftast finns en underballast och bankfyllning som består av olika berg- och jordmaterial. Oftast finns även en frostisolering för att skydda banvallen från tjällyftning. I äldre banvallar består frostisoleringen av många olika material, t ex kolaska, torv, mineralull, träslipers och slaggmaterial. Allt beroende på vad som fanns på just den platsen där banvallen byggdes (Almqvist, 2004).

2.3.2 Nyare banvall

Idag byggs banvallarna, till skillnad från de äldre, på liknande sätt överallt (figur 2-1). En ny banvall har högre krav på de olika lagren såsom val av material och geometri (Vectura, 2011a). Konstruktionen består av en överbyggnad, bestående av räls, slipers, växlar och fästen, samt en underbyggnad bestående av själva banvallen (Jansson, 2001). Under rälsen ligger ett lager med ballast av grovt material såsom makadam och/eller sand och grus (Cederlund m.fl., 2008). Ballasten ska vara av god kvalitet, vilket inkluderar material som har bra hårdhet, är slitstarkt, innehåller lite organiskt material samt är fri från lera (Jansson, 2001). En generell trend är att halten organiskt material där ämnen kan adsorberas är högre närmre banvallens kant och därmed omkringliggande mark. Även närmast rälsen är chansen stor att halten organiskt material är stor då det oftast är svårt att komma åt vid besprutning samt att löv och annat material kan fastna där (Cederlund, pers. medd., 2012b).



Figur 2-1. Schematisk bild över en nyare banvalls uppbyggnad (Andersson, 2002).

2.4 KEMISK OGRÄSBEKÄMPNING

2.4.1 Allmänt

Alla kemiska bekämpningsmedel klassas som giftiga varför en noggrann användning och ett gott medvetande om gällande lagar och regler krävs (Trafikverket, 2012b). De herbicider som kan återfinnas i svenska banvallar, såsom diuron, glyfosat och imazapyr, består av många olika föreningar som alla skiljer sig med avseende på molekylstruktur, flyktighet och densitet (SGI, 2002).

Sedan 2004 används enbart det kemiska bekämpningsmedlet Roundup Bio i Sverige (Trafikverket, 2012b). En mer noggrann beskrivning av medlet finns under avsnitt 2.4.6 *Roundup Bio - Glyfosat*. Ett annat medel som tidigare har används på banvallarna i

Sverige är det kemiska bekämpningsmedlet Arsenal 250 som beskrivs närmre under avsnitt 2.4.5 *Arsenal 250 - Imazapyr*. Det är utifrån detta bekämpningsmedel som den modell som ska utvärderas har konstruerats.

2.4.2 Historik

Användningen av kemiska bekämpningsmedel på banvallar har pågått i flera decennier men då många av dessa med tiden visat sig ge oönskade miljöeffekter har de förbjudits en efter en, se tabell 2-1. Det kanske mest uppmärksammade fallet var på åttioalet då man observerade att tallar dog längs med järnvägsspåren på vissa håll i landet. Det visade sig att tallarnas rötter hade trängt sig ned i banvallen och samlat vatten där även diuron fanns (Gustavsson, 2007), vilket gjorde att ämnet helt förbjöds 1993.

Tabell 2-1. Olika kemiska bekämpningsmedel som använts på svenska järnvägar de senaste årtiondena (Almqvist, 2004; Torstensson, 2005; Gustavsson, 2007).

Produkt	Aktiv substans	Användningsår
Karmex 80	Diuron	1974 - 1993
Roundup	Glyfosat	1986 - 1987
Spectra	Glyfosat	1987 - 1993
Arsenal 250	Imazapyr	1995 - 2004
Roundup Bio	Glyfosat	2004 - används fortfarande

Innan 1970 användes bland annat de kemiska bekämpningsmedlen amitrol, bromacil, diuron, manutron samt natriumklorat. Alla dessa har med tiden förbjudits på grund av deras skadliga effekter på miljön (Gustavsson, 2007). Bytet av *Roundup* till *Spectra* 1978 var endast ett namnbyte. *Roundup bio*, till skillnad från *Roundup*, innehåller inga tillsatser som är giftiga för vattenlevande organismer (Torstensson, 2005).

Glyfosat är inte verksamt mot åkerfräken varför en kombination av glyfosat och imazapyr användes en kort period innan imazapyr helt förbjöds 2004 då det var för lätttrörligt i banvallen (Gustavsson, 2007). Åkerfräken har ett kisellager som skyddar mot upptag av glyfosat. Detta gör att åkerfräken i dagsläget ökar i förekomst på banvallar (Torstensson, 2005).

2.4.3 Spridningsteknik och försiktighetsåtgärder

För att sprida bekämpningsmedlet Roundup Bio används sedan 2001 ett specialdesignat tåg som har anpassats av Trafikverket, med stöd SLU, se figur 2-2. Ogräståget är designat så att besprutningen hålls inom aktuellt område och minskar på så sätt spridningen till omgivningen. För rätt spridning av det kemiska bekämpningsmedlet finns ett datorstyrt styrsystem som beräknar mängden bekämpningsmedel, vatten samt vätmedel (Trafikverket, 2012a). Vätmedlet gör så att ämnets ytspänning minskar och herbiciden kommer i närmre kontakt med växten (Jonsson, muntl. kommentar, 2012a).



Figur 2-2. Trafikverket och SLU:s specialdesignade ogräståg (Trafikverket, 2012e).

Längst bak på tåget sitter en besprutningsanordning, en så kallad ogräsramp, som hjälper till att applicera medlet på banan, se figur 2-3. Konstruktionen är anpassad så att medlet ska pressas nedåt i marken för att minimera vindavdrift. Även ogrästågets hastighet på maximalt 25 m/s hjälper till att pressa ned medlet med hjälp av fartvinden (Trafikverket, 2012a).



Figur 2-3. Besprutningsanordning som sitter bak på ogräståget. Den så kallade ogräsrampen är designad så att bekämpningsmedlet pressas nedåt i marken för att minimera vindavdrift (Trafikverket, 2012a).

Vid arbete med kemiska bekämpningsmedel är det av största vikt att arbetet sker med försiktighet då risken för att medlet ska hamna i känsliga vattendrag och dricksvattenbrunnar ska förhindras (Jordbruksverket, 2011/2012). Som tidigare nämnts är gränsvärdet för glyfosat i dricksvatten 0,1 µg/l (Livsmedelsverket, 2001) varför det är viktigt att en säker användning av kemiska bekämpningsmedel uppehålls, speciellt vid vattenskyddsområden.

För att förhindra att bekämpningsmedlet sprids utanför spårområdet sker besprutning endast om det blåser mindre än 5 m/s och ingen risk för regn förefaller. Det får inte heller finnas någon risk för regn (Trafikverket, 2012c). För att störa tågtrafiken så lite som möjligt görs all besprutning nattetid (Trafikverket, 2012a).

Denna metod för spridning är certifierad med miljöstandarden ISO 14001 och kvalitetsstandarden ISO 9000 för att ett så säkert kontrollsystem som möjligt ska uppnås (Trafikverket, 2012e). Dock innefattar detta system endast utförande och inte en uppföljning ifall de medlen sprids till närliggande områden intill själva banvallen (Vectura, 2011a).

Personal som bedriver bekämpning av ogräs har behörighet att yrkesmässigt hantera bekämpningsmedel, så kallade gröna kort, som vart femte år måste förnyas (Trafikverket, 2012a). Det sker en kontinuerlig dialog med berörda kommuner och lagar, förordningar och föreskrifter ska följas. Mer om detta kan läsas i avsnitt 2.4.8 *Lagstiftning*.

Även andra metoder för applicering av bekämpningsmedel förekommer, då på kortare och begränsade spåravsnitt. Med den så kallade avstrykningsmetoden stryks medlet på växterna vilket gör att mängden medel kan minskas samt att vindavdriften minskar, se figur 2-4. Dock är denna metod inte så effektiv och proceduren måste därför ofta göras om flera gånger per säsong till skillnad från kemisk bekämpning med ogräståget som normalt endast behöver göras en gång per år (Trafikverket, 2012e). Avstrykningsmaskinen har dessutom en maximal hastighet på 8 km/h vilket stör den vanliga tågtrafiken för mycket för att kunna användas på längre sträckor (Almqvist, 2004). Andra problem med metoden är att om växterna är för stora vid avstrykningsapplicering kan detta göra att endast de övre växterna får på sig medlet och den underliggande vegetationen hindras från exponering (SWECO, 2005). För punktinsatser kan ryggsprutor användas (Trafikverket, 2012e), se figur 2-4.



Figur 2-4. Bilden till vänster visar en hur metoden för avstrykning går till (Trafikverket, 2012d) Bilden till höger visar hur punktinsatser för kemisk bekämpning med ryggspruta går till (Trafikverket, 2012e).

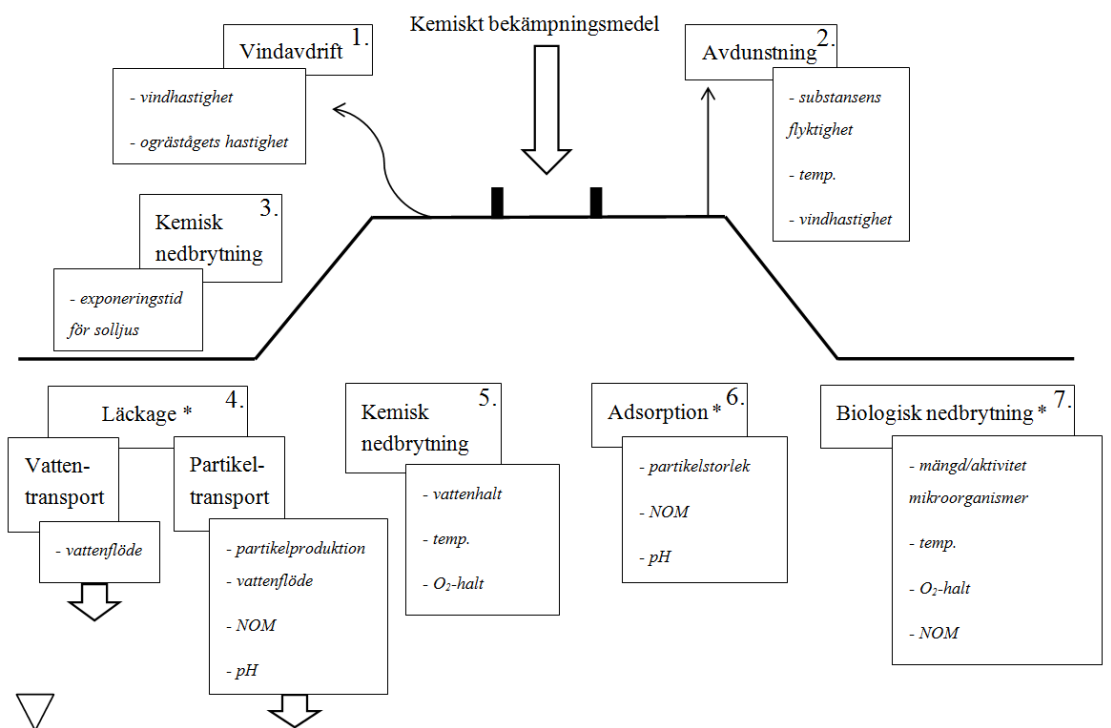
Även ballastrening förekommer. Det är en metod som görs med 20 – 30 års mellanrum då man sorterar bort partiklar med små kornstorlekar vilket gör att växter inte får samma chans att växa. Även en vegetationsspärr i form av ett tätt plast- eller betonglager kan hindra en del växter från att få fäste (SWECO, 2005).

För maximal effekt av ogräsbekämpningen bör temperaturen vara minst 14°C samt att behandlingen görs då det fortfarande är dagg i gräset. Då är växternas klyvöppningar öppna och preparatet tas upp snabbare (Tham, 2006).

Mängden bekämpningsmedel som Trafikverket använder årligen är mellan 2 000 och 4 000 kilo aktiv substans glyfosat, vilket motsvarar mindre än en procent av Sveriges årliga totala förbrukning (Trafikverket, 2012f).

2.4.4 Spridningsvägar och spridningsprocesser

När väl det kemiska bekämpningsmedlet hamnar på marken sprids det på olika sätt i miljön. Beskrivning av potentiella spridningsvägar samt vilka spridningsprocesser som sker visas i figur 2-5. De processer som tagits med i simuleringsmodellen markeras med en stjärna (*). De andra har valts bort då de inte anses ha en så stor betydelse för simuleringsresultaten i modellen och för att modellen är så pass robust uppbyggd.



Figur 2-5. Processer och spridningsvägar för kemiska bekämpningsmedel i miljön vid bekämpning på banvall (Modifierad från Brady & Weil, 1999; Almqvist, 2004.) De processer som markerats med en stjärna (*) har tagits med i simuleringsmodellen. NOM = naturligt organiskt material. De olika processernas betydelse beskrivs i texten.

1. Vindavdrift

För att besprutning ska få äga rum får det maximalt vara vindar med 5 m/s (Trafikverket, 2012c). Ogräståget är även utrustat med en speciell ramp som hindrar onödig vindavgång då ogräsmedlet pressas ned mot markytan (Trafikverket, 2012e).

2. Avdunstning

Avdunstning beror på substansens flyktighet och varierar med avseende på ämnets vattenlöslighet och bindning till markpartiklarna. Hur mycket som avdunstar beror också på lufttemperaturen och rådande vindhastighet (Torstensson, 1997). Även om kemikalierna avdunstar kan de komma tillbaka till marken via nederbörd.

3. *Kemisk nedbrytning (fotolytisk)*

Kemisk nedbrytning som sker ovan jord beror på exponeringen för solljus, så kallad fotolytisk nedbrytning. Solljusets UV-strålning startar en fotokemisk reaktion som gör att kemikaliernas bindningar börjar brytas ned (Brady & Weil, 1999; Torstensson, 2005).

4. *Läckage **

Läckage av bekämpningsmedel i form av vattentransport beror på den nederbörd som faller på banvallen. Mer vatten som perkolerar innebär större risk för att löst bekämpningsmedel kan ta sig till grundvattnet (Torstensson, 2005).

Läckage i form av partikeltransport beror på hur stor partikelproduktionen är. I och med att tåg passerar slits rälsen och banvallsmaterialet vilket leder till produktion av små partiklar. Dessa små partiklar rör sig nedåt i banvallen och kan då föra med sig det kemiska bekämpningsmedlet som adsorberas till partiklarnas yta (Vectura, 2001b). Även här spelar nederbörden en stor roll, precis som tillgången till organiskt material (Brady & Weil, 1999). Snabbast transport sker då nederbörden är jämn samt då temperaturen är hög (Torstensson, 1989).

Efter studier i banvallsmiljö med grovt material (Torstensson, 2005) påvisades det att både imazapyr och glyfosat tar sig ner genom de första 30 cm. Däremot transporteras ämnena olika genom de finare materialen, vilket beror då på herbicidens kemiska egenskaper liksom banvallsmaterialets egenskaper.

5. *Kemisk nedbrytning (hydrolytisk)*

Den kemiska nedbrytningen under jord är en hydrolytisk nedbrytningsmekanism som beror på tillgången till vatten. Ju större vattentillgång desto mer bryts ned till nästa metabolit (Brady & Weil, 1999), vilket i regel sker i markens vattenfas. Processen är starkt pH-beroende (Torstensson, 1989).

6. *Adsorption **

Adsorption beskrivs som fördelningen av bekämpningsmedel i en del som fastnar i markens organiska material och en del som förblir löst i marklösningen, se ekvation 1 (Brady & Weil, 1999).

$$K_d = \frac{mg \text{ förorening}/kg \text{ jord}}{mg \text{ förorening}/l \text{ lösning}} \quad (1)$$

där fördelningskoefficienten K_d definieras enligt ekvation 2 (Domenico & Schwartz, 1998).

$$K_d = f_{OC} \cdot K_{OC} \quad (2)$$

där f_{OC} är viktfraktionen av organiskt kol (g_{OC}/g_s) och K_{OC} är fördelningen av organiskt kol som beskrivs enligt ekvation 3 (Brady & Weil, 1999).

$$K_{OC} = \frac{mg \text{ sorberad förorening}/kg \text{ organsikt kol}}{mg \text{ förorening}/l \text{ lösning}} \quad (3)$$

Adsorptionsförmågan beror på vilket slags kemiskt bekämpningsmedel som applicerats samt vilken mark (typ av banvall) som herbiciden används på. Partikelstorleken spelar roll för adsorptionen då påverkan av hur stora jordtytor som herbiciden kan fastna på har betydelse. Lera, som har stor yta per massenhet, ger en större adsorption per massenhet (Brady & Weil, 1999). Detta ger att banvallar har en relativt liten adsorption i det översta lagret ofta består av ett grovt material. Även det låga innehållet av organiskt material ger liten adsorption (Almqvist, 2004). Dock ger en låg halt organiskt material oftast en minskning av mikrobiell aktivitet, vilket minskar nedbrytningen av herbiciden. Mikroberna påverkas av pH, hur hårt herbiciden binds till banvalls materialet samt tillgången på syre och vatten (Torstensson, 2005).

7. Biologisk nedbrytning *

På banvallar är målet att ackumulation av organiskt material ska undvikas eftersom det binder vatten vilket kan destabilisera banvallen. Banvallar har därför låg mikrobiologisk aktivitet vilket har påvisats genom flera tester på SLU (Cederlund m.fl., 2004; Cederlund m.fl., 2008). En låg mikrobiologisk aktivitet ger dock en långsam nedbrytning vilket i detta fall är negativt då bekämpningsmedel lättare kan spridas nedåt i banvallsprofilen. För att få bukt med detta rekommenderas en minskad dosering av herbicider samt att ett adsorptionslager integreras i banvallen vid byggnation av ny banvall (Cederlund m.fl., 2004).

I simuleringsmodellen presenteras den biologiska nedbrytningen av sönderfall av ämnet i form av halveringstid (med antagandet om första ordningens sönderfall), molekylvikt, eventuella nedbrytningsprodukter samt stökiometrin. Halveringstiden är den tid det tar för ämnet att till hälften brytas ned från given mängd till metaboliter (andra nedbrytningsprodukter). Nedbrytningshastigheten U för ämnet i modellen beräknas enligt ekvation 4.

$$U = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \quad (4)$$

där $t_{1/2}$ är herbicidens halveringstid.

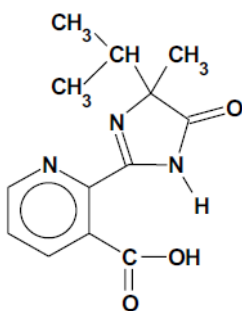
För imazapyr (beskrivs närmre i avsnitt 2.4.5 *Arsenal 250 – Imazapyr*) tillkommer en massförlust (massdifferens) i systemet då ingen hänsyn tas till nedbrytningsprodukter. Däremot vid simulering av glyfosat (beskrivs närmre i avsnitt 2.4.6 *Roundup Bio - glyfosat*) tillkommer nedbrytningsprodukten AMPA. AMPA:s nedbrytningsprodukt däremot simuleras inte varför en massförlust uppstår här istället.

Sammanfattning

Sammanfattningsvis kan nämnas att banvallens innehåll av grovt material leder till låg vattenhalt, lågt organiskt innehåll, låg biologisk aktivitet samt ökat partikelinnehåll under tidens gång. Detta gör att det applicerade kemiska bekämpningsmedlet, vid felaktig dosering eller hantering, bryts ned långsamt samtidigt som det snabbt kan ta sig ner genom banvallen till grundvattnet.

2.4.5 Arsenal 250 - Imazapyr

Det kemiska bekämpningsmedlet Arsenal 250, med den aktiva substansen imazapyr, används i banvallar mot icke önskad växtlighet, främst fräkenväxter och stenbär. Medlet tas upp i växten via bladen och rötterna och hämmar växtens biosyntes av vissa aminosyror, vilket gör att växten tillslut dör (Kemikalieinspektionen, 2012a). Då imazapyr har en hög rörlighet i markprofilen finns risk för kontaminering i yt- och grundvatten varför medlet inte används på banvallar i närheten av vattenskyddsområden (Trafikverket, 2012c). Imazapyr har ett lågt log K_{OW} – värde vilket betyder att bioackumuleringen i växten är låg. Imazapyr har en långsam nedbrytning med en halveringstid på 17 till 37 månader och fynd av stabila metaboliter har inte hittats. Hälsoeffekter på människan har inte kunnat visas, men försök på kanin visar att imazapyr kan ge långvarig ögonirritation samt svag hudirritation. Vidare studier visar att lågt pH minskar rörligheten samt att ämnet är hydrolytiskt stabilt vid pH 5 och pH 9 (Kemikalieinspektionen, 2012a). För minsta möjliga spridning i miljön ska en maximal dos på 2 l/ha och val av säsong för besprutning följas (Kemikalieinspektionen, 2012c). Imazapyrs strukturella uppbyggnad kan ses i figur 2-6.



Figur 2-6. Imazapyr (Kemikalieinspektionen, 2012).

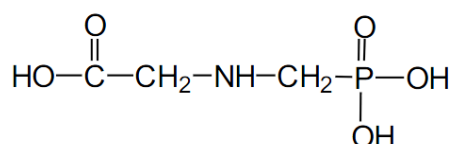
2.4.6 Roundup Bio - Glyfosat

Roundup Bio introducerades av Monsanto 1974 och är den mest använda herbiciden i världen (Bergström m.fl., 2011). Eftersom glyfosat är effektiv och en relativt billig produkt på marknaden används medlet i stora kvantiteter (Sterner, 2003).

Roundup Bio är ett växtskyddsmedel med den aktiva substansen glyfosat och används mot oönskad växtlighet på banvallar, inom jordbruket, i parker, m.m. (Kemikalieinspektionen, 2012b). Glyfosats struktur kan beskrivas som ett kvävesubstituerat alifatiskt kolväte med en fosfatgrupp, se figur 2-7 (SGI, 2002). Glyfosat tas upp i växtens delar som är ovan jord och sprider sig sedan i hela växten, även ner till roten, och hindrar bildningen av vissa aminosyror. Detta leder till att bildandet av proteiner som bygger upp växten hindras vilket resulterar i att växten dör (Kemikalieinspektionen, 2012b). Det bör påpekas att endast 25 % av medlet tas upp i växten och att en ännu mindre andel fördelas i växten, vilket gör att en stor andel obrukat medel finns kvar i jorden, utanför växten. Om medlet ska fungera med största möjliga effekt bör växten befinna sig i tillväxt (Sterner, 2003). Glyfosat binds starkt till marken och bryts ned snabbt vid normal mikrobiell aktivitet. AMPA

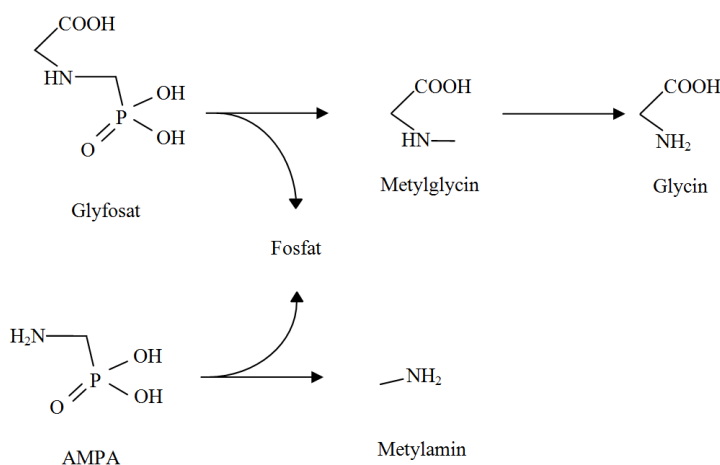
(aminometylfosforsyra), som är en av glyfosats nedbrytningsprodukter, däremot rör sig något snabbare i marken och bryts ned långsammare än glyfosat som har en halveringstid på några dagar till flera år. Hur snabbt det går beror på hur hög den mikrobiella aktiviteten är (Kemikalieinspektionen, 2012b) då det visat sig att mikroorganismer använder glyfosat som fosforkälla. Glyfosats metabolit AMPA hydrolyseras till metylamin och oorganiskt fosfor och senare N-metylglycin, se figur 2-8 (Sterner, 2003).

Det har inte kunnat påvisas några allvarliga eller måttliga effekter på land- och vattenlevande organismer av glyfosat, inte heller transport i ytvattnet har kunnat påvisas. Då log K_{OW} -värdet är negativt sker ingen bioackumulering. De hälsoaspekter som glyfosat påvisat på människan vid spillolyckor, är illamående och hudirritation. Glyfosat är hydrostabilt medan AMPA hydrolyseras snabbt (Kemikalieinspektionen, 2012b).



Figur 2-7. Glyfosat (Kemikalieinspektionen, 2012).

Roundup Bio är tillåtet för användning inom ramen för vegetationsbekämpning längs banvallar och har bland annat krav på rapportering vid annan förbrukning än anvisat samt krav på information om risker och faror vid användning (Kemikalieinspektionen, 2012d).



Figur 2-8. Glyfosat och dess nedbrytningsprodukter (Sterner, 2003).

2.4.7 Miljömål

Definitionen för miljömål 4 *Giftfri miljö* lyder enligt följande: ”Förekomsten av ämnen i miljön som har skapats i eller utvunnits av samhället ska inte hota människors hälsa

eller den biologiska mångfalden” (Miljömålsportalen, 2012). Ett av delmålen är *Fortlöpande minskning av hälso- och miljöriskerna med kemikalier* men detta uppnåddes inte till året 2010 vilket var målet. Även om många risker med bekämpningsmedel har kunnat minskas och undvikas krävs fortfarande fler studier och mer kunskap om dessa ämnen och dess påverkan på miljön.

Enligt Trafikverkets miljörapport (2010a) ska hälso- och miljöriskerna vid användning av kemiska ämnen minska fram till 2010, enligt det nämnda miljö kvalitetsmålet *Giftfri miljö* och delmålet om *fortlöpande minskning av hälso- och miljörisker med kemikalier*. Inom Trafikverket finns idag god kännedom om vilka preparat som används genom deras interna kemikaliehanteringssystem. Dock krävs mer kunskap, tydligare mål och kraftfulla insatser för att kunna minska användningen och senare fasas ut helt. Genom att uppnå miljömålet *Giftfri miljö* uppnås också indirekt miljömålen *Grundvatten av god kvalitet*, *Levande sjöar och vattendrag*, *Ett rikt växt och djurliv*, *God bebyggd miljö*, *Begränsad miljöpåverkan* samt *Bevarande av biologisk mångfald*.

2.4.8 Lagstiftning

Det finns ett omfattande regelverk som rör användningen av kemiska bekämpningsmedel. Den lagstiftning som berör Trafikverket vid användning av kemiska bekämpningsmedel är föreskrifter med tillhörande allmänna råd från Naturvårdsverket samt föreskrifter från Kemikalieinspektionen (Trafikverket, 2012b).

Föreskriften Spridning av kemiska bekämpningsmedel 1997:2 (SNFS, 1997) med tillhörande allmänna råd om spridning av kemiska bekämpningsmedel skriver att ”allmänna råd är rekommendationer som syftar till att främja en enhetlig tillämpning av lag, förordning och föreskrifter och anvisar hur den enskilde lämpligen kan handla i vissa situationer utan att utesluta andra handlingsätt.” (Naturvårdsverket, 1997). Dessa allmänna råd ska vara ett stöd vid arbete kring användning av kemiska bekämpningsmedel och är utarbetade av Naturvårdsverket i samråd med Kemikalieinspektionen, Jordbruksverket och Lantbrukarnas Riksförbund.

Före användning måste ett kemiskt bekämpningsmedel vara godkänt av Kemikalieinspektionen samt tydligt ange inom vilket tillämpningsområde användningen gäller. Detta godkännande håller vanligtvis i fem år men kan sedan förnyas (Naturvårdsverket, 1997). Kemikalieinspektionens föreskrifter om bekämpningsmedel (KIFS, 2008) ska följas.

3. MATERIAL OCH METODER

Material och metoder som presenteras i detta avsnitt är både för imazapyr och för glyfosat. Den använda simuleringsmodellen har liknande modelluppbyggnad för båda preparaten men har olika studieområden, olika modellparametriseringar och olika problemställningar.

3.1 STUDIEOMRÅDEN OCH TYPMILJÖER

3.1.1 Studieområde för imazapyr

Studieområdet för imazapyr är provpunkt 760 i Ina som ligger väster om Söderhamn, se karta i figur 3-1. Banvallens översta lager vid provplats 760 består av ett tunt lager makadam (cirka 40 cm) med 0,51 % organiskt innehåll, över ett flera meter mäktigt sandlager (Almqvist, 2004). Banvallen räknas därmed vara en banvall av äldre karaktär. Tvärsektionen över banvallen kan studeras i bilaga B. Uppmätta grundvattennivåer låg på mellan 1,4 och 1,9 m på projektets första dag 1994-08-06 (Jarvis m.fl., 2006).



Figur 3-1. Provplatser som undersökts i enighet med miljökontrollprogrammet (Tågsjöberg, Ånge, Hökberget, Broddbo, Lunda, Hasselfors, Stafsinge samt Skörpinge) samt provplatsen Ina (Kartmaterial från Trafikverket, modifierad).

3.1.2 Studieområde för glyfosat

I Trafikverkets miljökontrollprogram har man velat uppnå olika provplatser med olika kombinationer av närzon och fjärrzon för att få en bred bas. Hänsyn har tagits till det geografiska läget så väl som nederbördsmängd, nederbördens pH (surt regn), klimatberoende variationer i ogrästryck samt jordart (Vectura, 2011a). De platser som valdes ut och inventerades 2006 är Ängelholm (Skörpinge), Falkenberg, Lunda, Hasselfors, Broddbo, Hökberget, Tågsjöberg och Ånge. För orternas placering i

Sverige, se karta i figur 3-1. De olika kombinationerna av närzon och fjärrzon kan studeras i bilaga A.

De provplatser som har uppvisat glyfosat och AMPA-koncentrationer i grundvattnet är platserna Skörpinge, Hasselfors och Lunda. En redovisning av antal prover och koncentrationer av glyfosat och AMPA redovisas i nästkommande avsnitt.

Platsen Skörpinge representerar en närzon av nyare järnväg med naturligt material i bankfyllningen och en fjärrzon med siltig-lerig morän, generellt. Skörpinge kan mer i detalj beskrivas ha en jordart bestående av skånsk moränlera (Jonsson, muntl. kommentar, 2012c). Detta innebär att Kd-värden på denna plats troligtvis är de största samt att halveringstiden är den kortaste. Hasselfors representerar en närzon av äldre järnväg med naturligt material i bankfyllningen och en fjärrzon med siltig-lerig morän. Troligtvis sker den lägsta aktiviteten och således den längsta halveringstiden här då jordarten i mer detalj kan beskrivas som morän med siltigt inslag (Jonsson, muntl. kommentar, 2012c). Kd-värdet förväntas vara relativt högt även här. Lunda, som ligger nära Uppsala, har dåliga förutsättningar för biologisk aktivitet vilket kan förklaras av jordarten som består av morän med inslag av silt och lera. Även här kan Kd-värdet förväntas vara relativt högt (Jonsson, muntl. kommentar, 2012c).

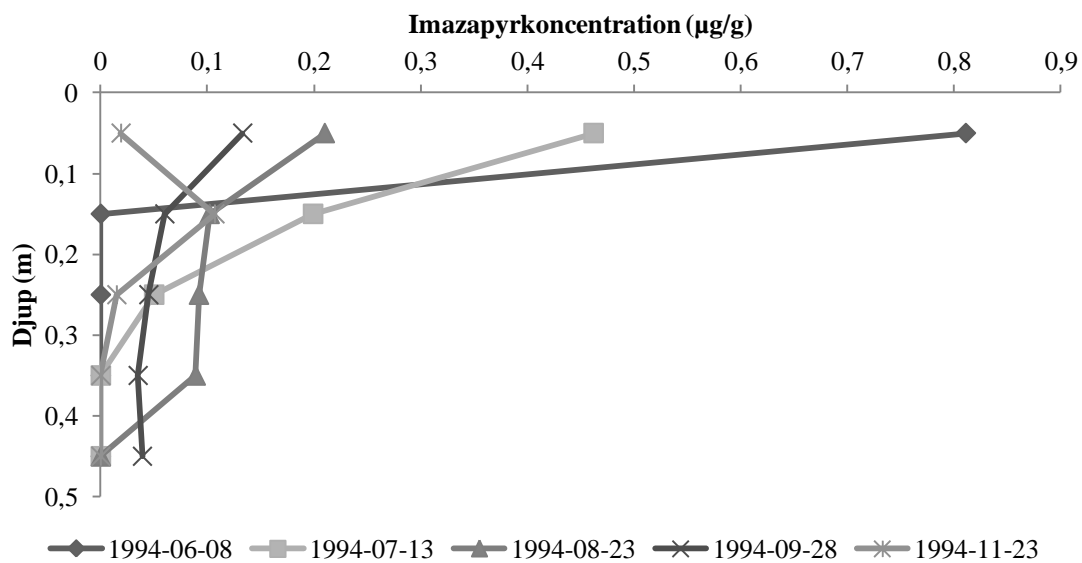
3.2 PROVTAGNING OCH DATA

Befintlig data från Trafikverkets kontrollprogram har använts varför inga egna mätningar har gjorts i detta examensarbete.

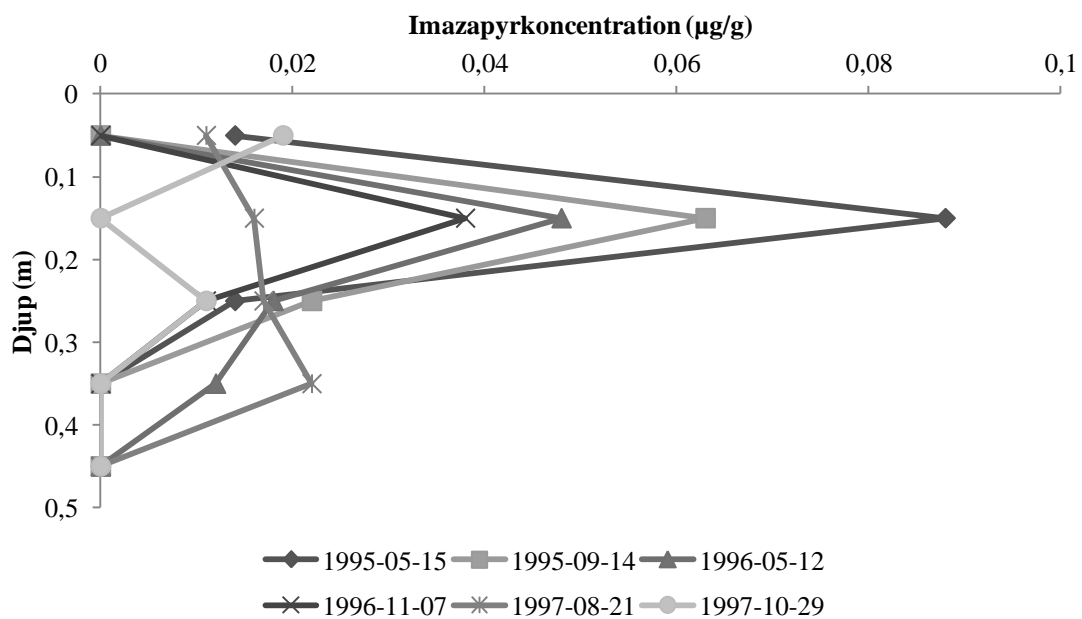
Redovisning av provtagningsplatser och provdata för imazapyr, glyfosat respektive AMPA, se nedan. Det är dessa värden som simuleringsmodellen har kalibrerats efter och en ingående analys av provtagningen innefattas inte av detta examensarbete.

3.2.1 Provdata för imazapyr från provplatsen Ina

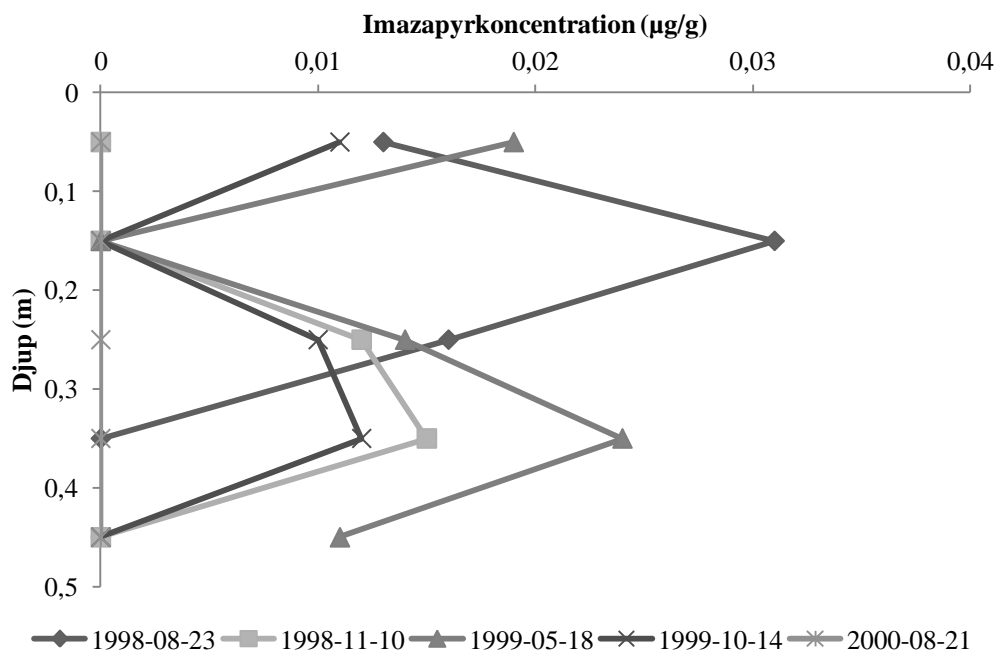
Data som använts för att jämföra med de simulerade resultaten från spridningsmodellen har hämtats från provplats 760 i Ina. Besprutningen skedde den 8 juni 1994 med en dos på 6 l/ha Arsenal, vilket innebär 1,5 kg/ha aktiv substans imazapyr, och provtagning påbörjades samma dag (Vectura, 2011b). Mätningar har sedan gjorts vid ytterligare fyra tillfällen under 1994. Mellan åren 1995 och 1999 har två prover tagits varje år. Resultaten av dessa mätningar återfinns i figur 3-2, figur 3-3 samt figur 3-4. Observera att skalan för koncentrationerna i figurerna 3-2, 3-3 samt 3-4 är olika.



Figur 3-2. Observerade koncentrationer av imazapyr i banvall vid kalenderdatum 1994-06-08, 1994-07-13, 1994-08-23, 1994-09-28 samt 1994-11-23.

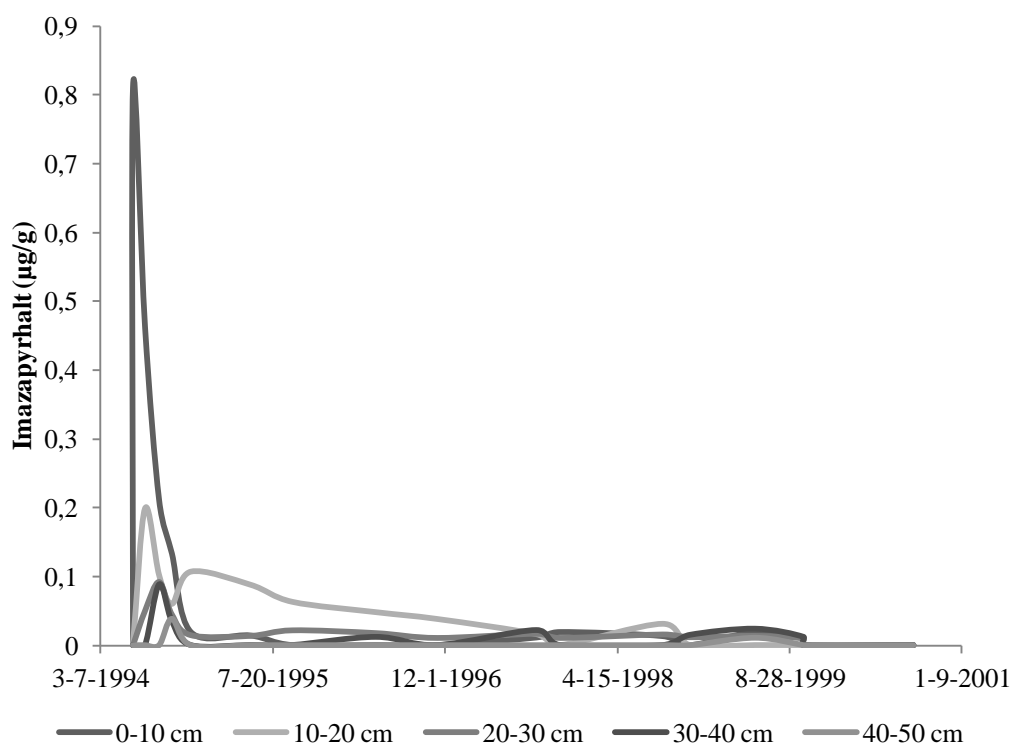


Figur 3-3. Observerade koncentrationer av imazapyr i banvall vid kalenderdatum 1995-05-15, 1995-09-14, 1996-05-12, 1996-11-07, 1997-08-21 samt 1997-10-29.



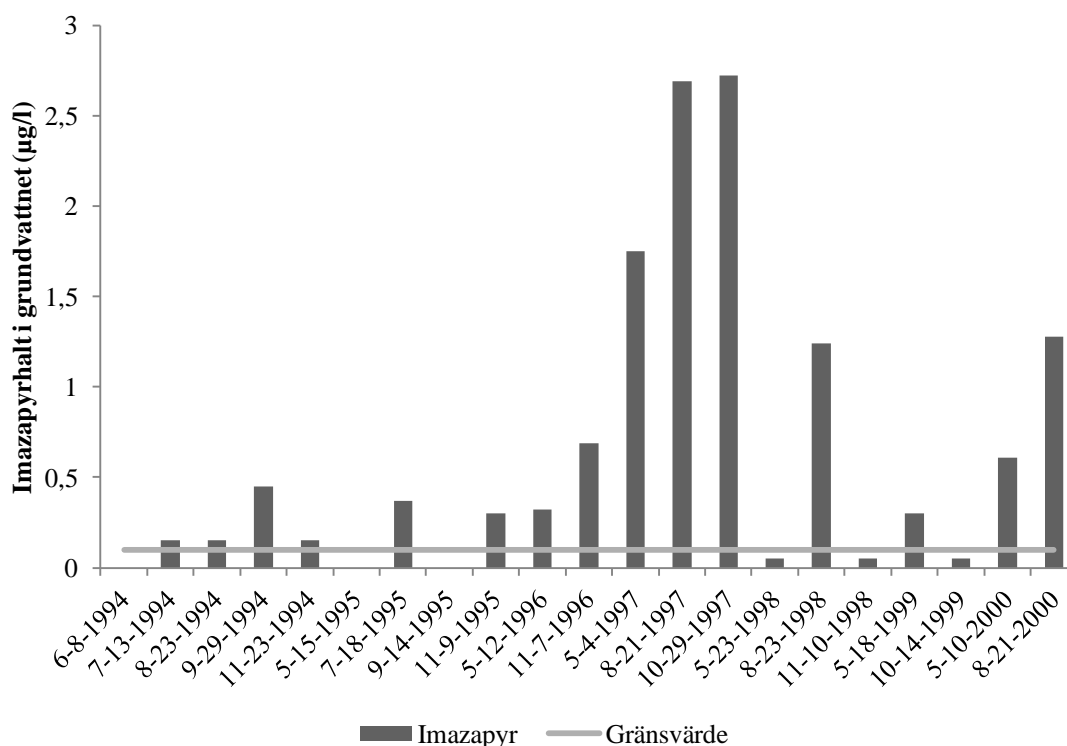
Figur 3-4. Observerade koncentrationer av imazapyr i banvall vid kalenderdatum 1998-08-24, 1998-11-11, 1999-05-19, 1999-10-08 samt 2000-08-21. Observera att inga imazapyrhalter hittades 1999-10-08 samt 2000-08-21.

För uppmätta koncentrationer av imazapyr i banvall för olika djup mellan åren 1994 och 2000, se figur 3-5.



Figur 3-5. Uppmätta koncentrationer av imazapyr i banvall för olika djup mellan åren 1994 och 2000.

Även i grundvattnet under banvallen togs prover. Resultatet kan ses i figur 3-6. I figuren kan även gränsvärdet för tillåten imazapyrkoncentration (enligt Livsmedelsverket) i vattnet ses.

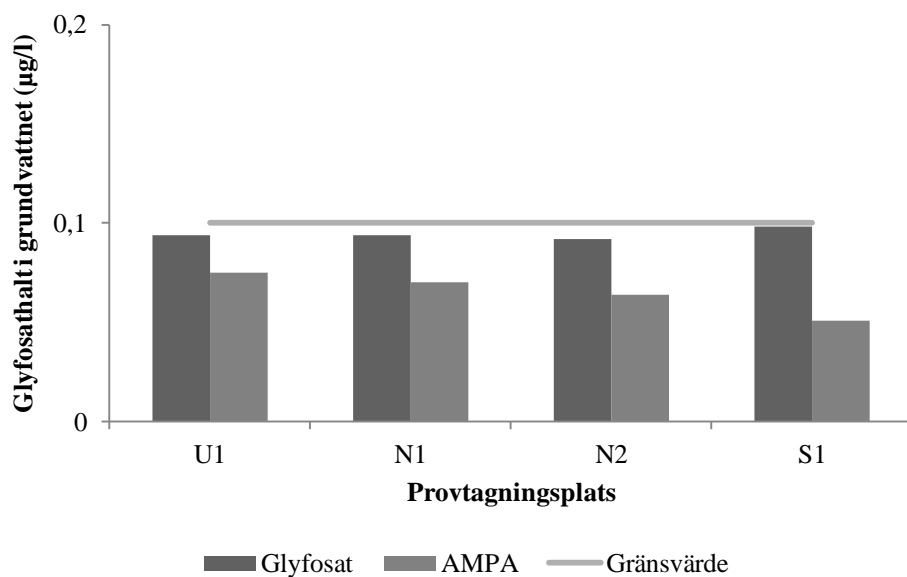


Figur 3-6. Observerade koncentrationer av imazapyr i grundvattnet. Gränsvärdet enligt Livsmedelsverket (2001) är 0,1 µg/l och representeras av den ljusgrå linjen i grafen.

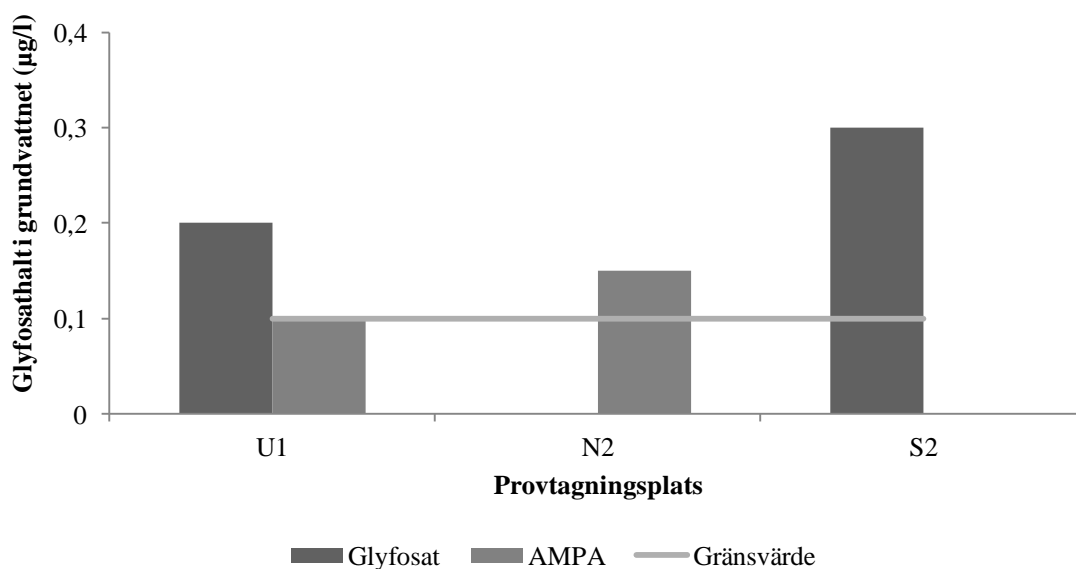
3.2.2 Provdatabaser för glyfosat vid provplatserna Skörpinge, Hasselfors och Lunda

I enlighet med uppförandet av miljökontrollprogrammet (Golder, 2008) var ett av syftena att kunna jämföra uppmätta halter funna i grundvattnet mot de simulerade resultaten i spridningsmodellen. Provtagning har skett på åtta platser runt om i Sverige men endast vid provplatserna i Ängelholm-Skörpinge och Hasselfors har detekterade koncentrationer av herbiciden kunnat hittas. Nedan presenteras en sammanställning av funna halter på platserna Skörpinge 2008 och 2009 samt Hasselfors 2009, se figur 3-7, figur 3-8 och figur 3-10. I figurerna kan även gränsvärdet för tillåten glyfosatkoncentration i vattnet ses. Även i Lunda påträffades glyfosat i grundvattnet, men endast ett mätvärde. Det låg på 0,25 µg/l och påträffades år 2009.

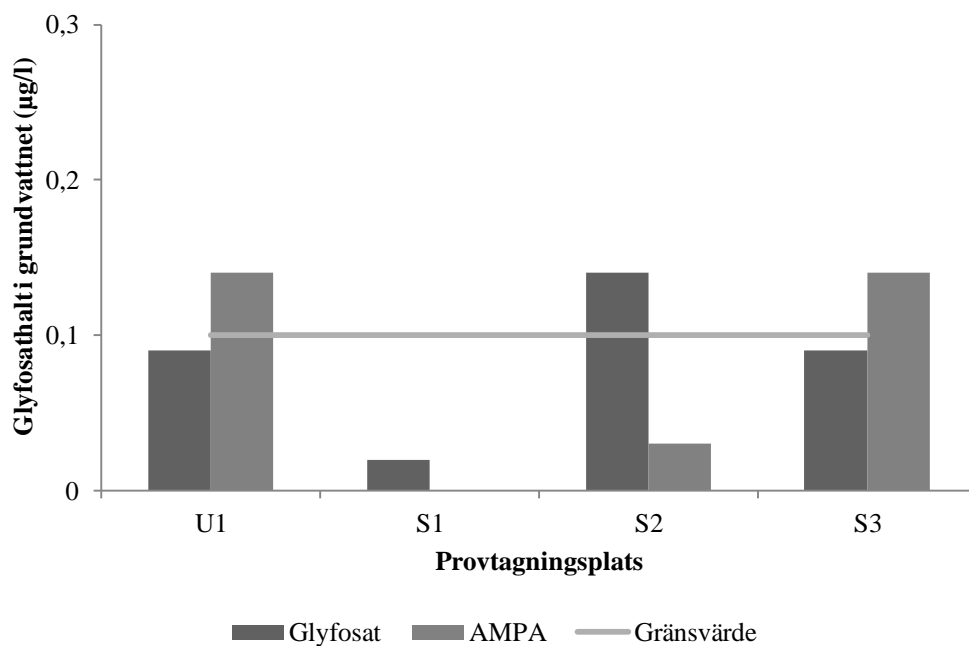
I spridningsmodellen för detta examensarbete har funna halter från Skörpinge, Hasselfors och Lunda slagits samman för att få fler prover att jämföra med. Det bör påpekas att även det totala antalet prover är för få för att statistisk kunna säkerställa samband mellan uppmätta och simulerade halter. För att kunna verifiera modellen för glyfosat krävs att fler prover tas, något som inte innefattas i detta examensarbete. Även jordprover skulle vara bra att ha tillgång till för att kunna jämföra simulerade halter i modellen. Dock har det gjorts jordinsamlingar men dessa innehöll endast makadam varför det inte fanns någon jord att tillgå för provtagning.



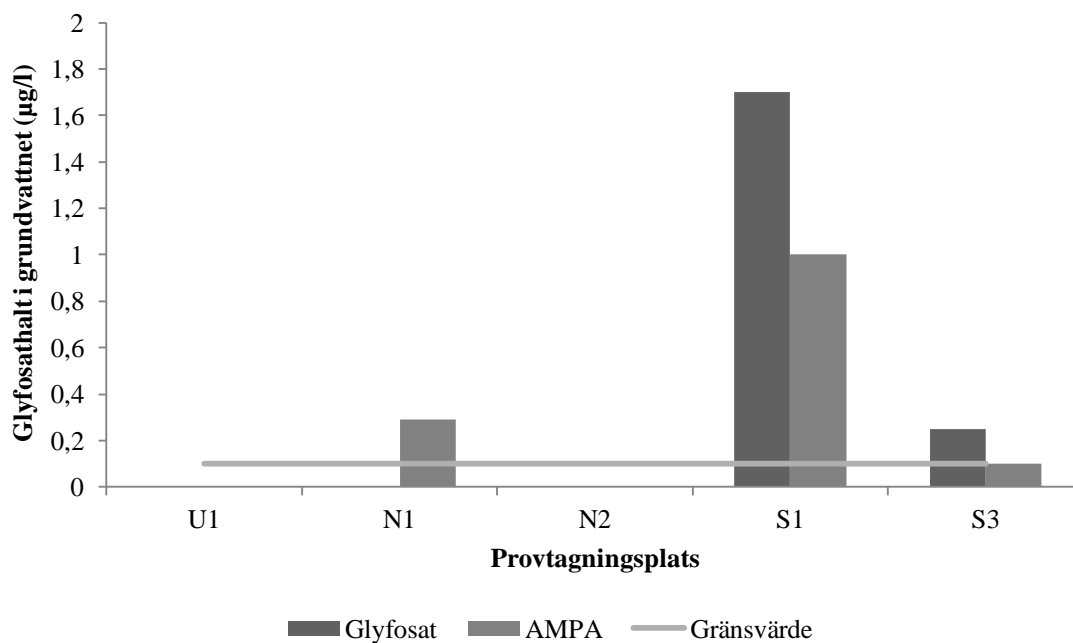
Figur 3-7. Observerade koncentrationer av glyfosat och AMPA i grundvattnet i Skörpinge 2008. Gränsvärdet enligt Livsmedelsverket (2001) är 0,1 µg/l och representeras av den ljusgrå linjen i grafen. Observera att alla halter ligger under rapporteringsnivån från laboratoriet. U1 = provplats 1 uppströms, N1 = provplats 1 nedströms, N2 = provplats 2 nedströms, S1 = provplats 1 under spår.



Figur 3-8. Observerade koncentrationer av glyfosat och AMPA i grundvattnet i Skörpinge 2009. Gränsvärdet enligt Livsmedelsverket (2001) är 0,1 µg/l och representeras av den ljusgrå linjen i grafen. U1 = provplats 1 uppströms, N2 = provplats 2 nedströms, S2 = provplats 2 under spår.



Figur 3-9. Observerade koncentrationer av glyfosat och AMPA i grundvattnet i Skörpinge 2010. Gränsvärdet enligt Livsmedelsverket (2001) är 0,1 µg/l och representeras av den ljusgrå linjen i grafen. U1 = provplats 1 uppströms, S1 = provplats 1 under spår, S2 = provplats 2 under spår, S3 = provplats 3 under spår.



Figur 3-10. Observerade koncentrationer av glyfosat och AMPA i grundvattnet i Hasselfors 2009. Gränsvärdet enligt Livsmedelsverket (2001) är 0,1 µg/l och representeras av den ljusgrå linjen i grafen. U1 = provplats 1 uppströms, N1 = provplats 1 nedströms, N2 = provplats 2 nedströms, S1 = provplats 1 under spår, S2 = provplats 2 under spår (ej provtagen), S3 = provplats 3 under spår.

3.3 PROBLEMSTÄLLNING

Nedan beskrivs problemställning med simuleringsmodellen för respektive bekämpningsmedel, imazapyr och glyfosat.

3.3.1 Simulering med imazapyr

Enligt tidigare simuleringar fungerar modellen väl och visar en bra anpassning (Vectura, 2012b). Vid närmare studier skikt för skikt stämmer anpassningen sämre. Dock är tanken med modellen att den ska fungera för hela profilen. Löst imazapyr i grundvattnet kunde inte presenteras i befintlig modell varför detta har setts över vid kontrollen och utvecklingen av spridningsmodellen. Inte heller fungerade begynnelsevärdet i översta skiktet i banvallen i modellen, varför detta har setts över.

Kalibreringen av spridningsmodellen representeras inte av en specifik plats utan utgör mer ett exempel på en generell plats.

Spridningsmodellen har testats statistiskt samt undersöks med avseende på vilka parametrar som är känsliga med hjälp av en känslighetsanalys.

3.3.2 Simulering med glyfosat

Simuleringsmodellen har efter den kalibrerats och utvecklats parametriserats för att kunna göra körningar med glyfosat istället för imazapyr.

Scenarier för simulering av glyfosat

Spridningsmodellen har testats vid känsliga lägen med kritiska hydrogeologiska miljöer, olika scenarier eller så kallade ”worst-case-körningar”. För att uppnå detta har åtta olika scenarier, A-H, konstruerats. De parametrar som ändrats är *avståndet till grundvattenytan*, *Kd-värde* samt *halveringstid*, se tabell 3-1. De mest troliga värdena för dessa parametrar återfinns i tabell 3-3.

Tabell 3-1. Åtta olika scenarier för simulering av glyfosat.

Scenario	Grundvattenytan (m)	Kd-värde (l/kg)		Halveringstid (d)	
		Glyfosat	AMPA	Glyfosat	AMPA
A	0,5	15 - 60	1,5 - 5,9	24	124,1
B	0,5	60 - 104	5,9 - 10,4	24	124,1
C	1	15 - 60	1,5 - 5,9	24	124,1
D	1	60 - 104	5,9 - 10,4	24	124,1
E	0,5	15 - 60	1,5 - 5,9	242	489,1
F	1	15 - 60	1,5 - 5,9	242	489,1
G	0,5	60 - 104	5,9 - 10,4	242	489,1
H	1	60 - 104	5,9 - 10,4	242	489,1

3.4 PROGRAMBESKRIVNING

För att lösa uppgiften att kunna simulera spridningen av bekämpningsmedel i en järnvägsbanvall har simuleringsprogrammet GoldSim används. En beskrivning av programmet kan ses nedan i avsnitt 3.4.1 *GoldSim*.

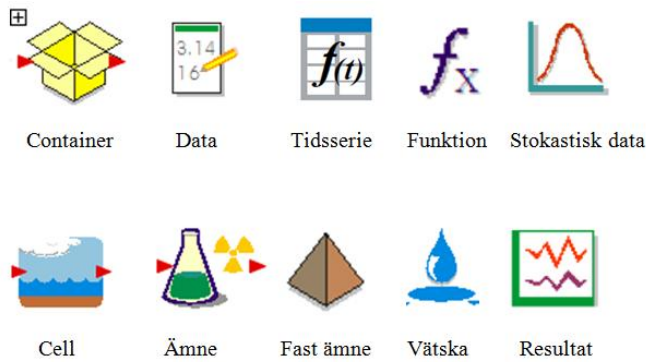
Styrkan i att använda simuleringar är att det låter användaren undersöka och utvärdera systemet utan att experimentera på det ”riktiga” systemet. På detta sätt kan projektet bli mer kostnadseffektivt, spara tid samt vara mer praktiskt (GoldSim, 2012a). Lokala felkällor och metodfel kan undvikas vilket annars är vanligt vid fältmetoder. Simulering gör det även möjligt att göra ett stort antal upprepningar över tiden. Mätning i fält ger endast en bild av enstaka ”nålstick” i markprofilen (Jonsson, muntl. kommentar, 2012b) även om detta också ger en bild av verkligheten. Genom att simulera den tänkta händelsen tillåts du ställa frågan ”tänk om..” utan att äventyra systemets framtid i onödan. Dessutom är modellerandet en del av inläringen av hur ett system fungerar och uppför sig (Beven, 2009). I de flesta riktiga system finns det alltid vissa parametrar som är stokastiska, alltså slumpmässiga, och osäkra och man vill genom simulering identifiera och kvantifiera dessa parametrar. Genom att inkludera osäkerheterna i modellens kalkyleringar som sannolikhetsfördelningar blir osäkerheterna kvantifierade i simuleringarna och görs genom att använda så kallade Monte Carlo-simuleringar. Dessa går till som så att ett stort antal simuleringar körs där varje parameteruppställning har lika stor sannolikhet och benämns som en realisering av systemet. Alla osäkerhetsparametrar samlas för varje realisering och simuleringen körs sedan över tiden. Resultatet blir flera olika möjliga framtidsscenarier för varje separat resultat som sammanfattas i en sannolikhetsfördelning av möjliga utfall (GoldSim, 2012b). I och med datorernas ständiga utveckling kommer simuleringssystemen i framtiden bara kunna ge bättre och bättre estimeringar genom att simulera och uppmätta skillnader ständigt utvärderas och då blir tydligare (Beven, 2009).

3.4.1 GoldSim

GoldSim är en etablerad kommersiell mjukvara som används bland annat av Department of Energy i USA, JNC i Japan, Enresa i Spanien samt Andra i Frankrike för säkerhetsanalys av planerad slutdeponering av använt kärnbränsle. I dagsläget används GoldSim inom ett brett fält, t ex som beslutsstöd i samband med utveckling av nya läkemedelsprodukter eller ekonomiska modeller (Forsman, pers. medd., 2012).

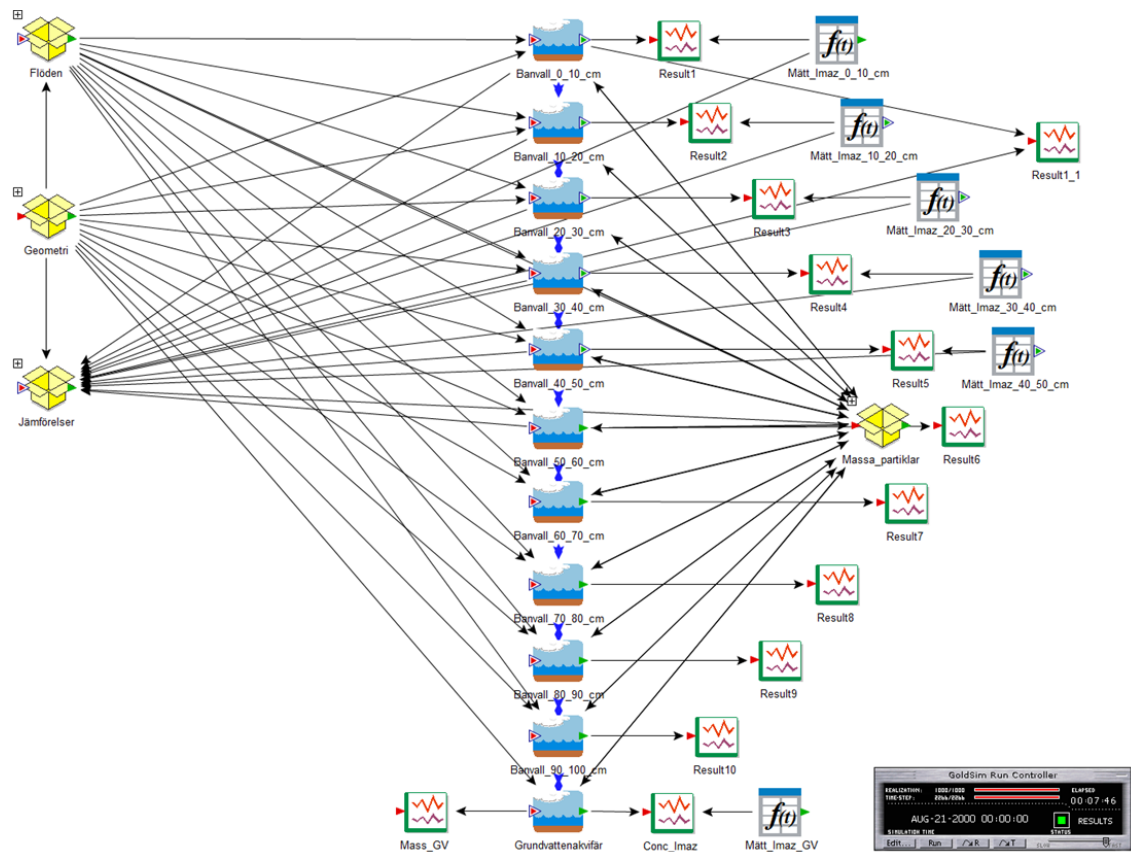
Den grundläggande filosofin är så kallad ”top-down”-modellering, vilket innebär att modeller lätt ska kunna byggas för att testa olika scenarier i tidiga och osäkra skeden av en process när dataunderlaget ofta är litet. Scenarieanalyserna kan ligga till grund för informationsinhämtning och modellen förfinas i takt med att mer data blir tillgängliga. En annan grundläggande idé är att hålla GoldSim-modellerna så enkla som möjligt och ta hänsyn till osäkerheter genom hela simuleringprocessen, från indata till resultat (Forsman, pers. medd., 2012).

Simuleringsmodeller som byggs i simuleringssystemet GoldSim innefattar olika ”boxar” som bygger upp själva modellen. Varje element representerar en parameter, en process eller en händelse, se figur 3-11.



Figur 3-11. Beskrivning av ikoner i GoldSim.

En schematisk bild över hur en simuleringsmodell kan vara uppbyggd i GoldSim kan betraktas i figur 3-12. Det är också denna modelluppställning som legat till grund för modellutvecklingen som detta examensarbete innefattar.



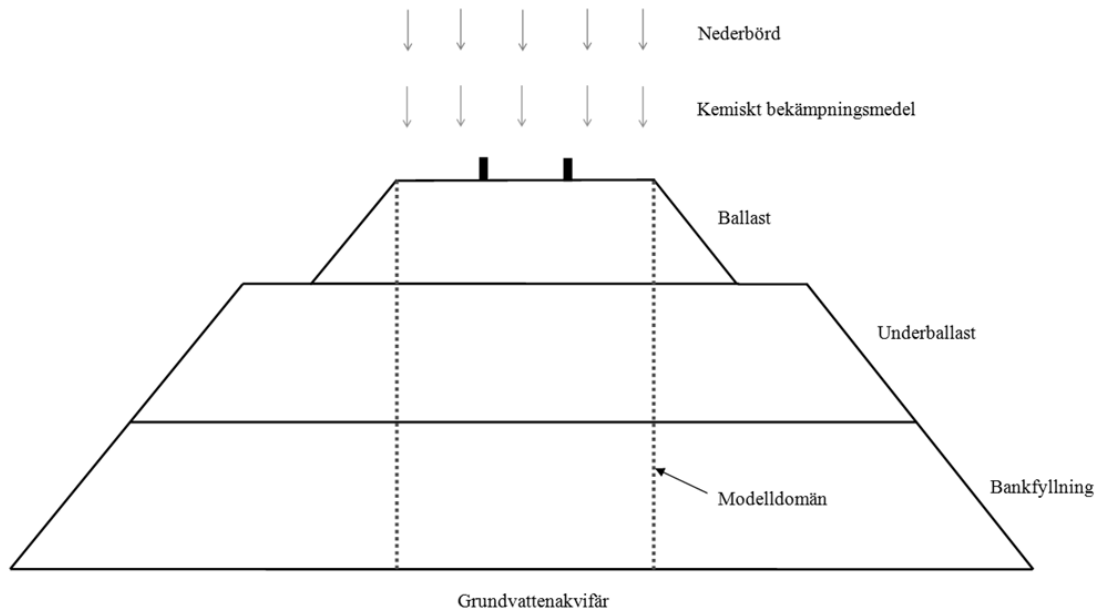
Figur 3-12. Schematisk bild över uppbyggnaden av en spridningsmodell i simuleringsprogrammet GoldSim. Det är också denna modelluppställning som är den befintliga modellen som detta examensarbete har utgått ifrån vid modellutvecklingen.

3.5 SPRIDNINGSMODELLENS UPPBYGGNAD

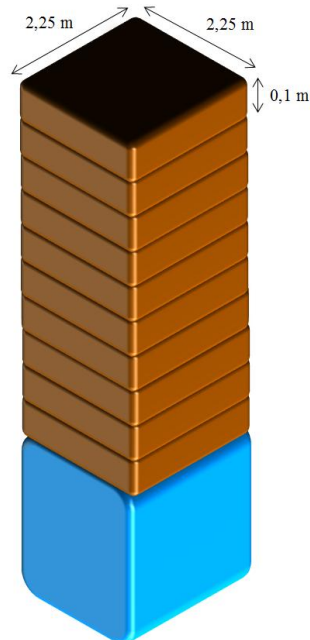
3.5.1 Konceptuell modell och geometri

Den konceptuella modellen visar hur banvallen, av äldre typ, är uppbyggd i simuleringsprogrammet, se figur 3-13. Transportvägarna påverkas av modelldomänens geometri och egenskaperna i varje deldomän påverkar vatten- och partikelhastighet samt

bekämpningsmedlets adsorption och/eller transport i respektive genom banvallen. För att beskriva transportprocesserna genom banvallen används lagen om massans bevarande. Hur själva modelldomänen är uppbyggd kan studeras i figur 3-14.



Figur 3-13. Konceptuell geometrisk modell av äldre banvall (Vectura, 2011b. Modifierad)



Figur 3-14. Konceptuell modelldomän i GoldSim som visar domänens geometriska mått. Modellen är indelad i tio skikt som alla har måtten 2,25 x 2,25 x 0,1 m. Under de tio skikten finns grundvattenakvifären. Denna parameter, liksom de olika skikten, kan justeras efter önskad storlek. I aktuell modell är volymen satt till 100 m³.

3.5.2 Modellparametrisering, imazapyr

Simuleringsmodellen innehåller parametrar som behöver parametriseras beroende på ämne och geografiskt läge. En sammanställning av material och materialegenskaper för imazapyrmodellen kan ses i tabell 3-2.

Materialegenskaperna beskrivs med sannolikhetsfördelningar, diskret, uniform och triangulär. Med dessa tre olika fördelningar ges möjligheten att ta hänsyn till osäkerheter hos indata i modellen. I en diskret fördelning antas endast ett värde och ses då som en konstant. I en uniform fördelning antas värdet ligga någonstans mellan det angivna minsta värdet och största värdet, då med samma sannolikhet. I en triangulär fördelning antas det värde som ligger mellan det minsta, mest troliga och största värdet.

I modellen finns ett ”extra-ämne” specificerat (”susp”) för att möjliggöra en massbalans för suspenderade partiklar i markvattnet. Dessa partiklar representerar de småpartiklar som tillförs banvallen från omgivningen genom vindtransport och slitage och mekanisk nötning av den översta ballasten. Imazapyr antas kunna adsorbera till dessa partiklar och på så sätt transporteras med marklösningen ned i banvallen, varför denna parameter är av största vikt att ha med i modellen. Kortfattat kan sägas att ”extra-ämnet” har en funktion som gör att mängden partiklar kan beräknas med avseende på tiden. Teoretiskt sett kan partiklarna adsorbera till banvallsmaterialet, något som inte tas hänsyn till i denna modell (Vectura, 2011b). Partikelproduktionen på $0,45 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{dygn}$ är framräknad av Almqvist (2004) med antagandet om att produktionen är konstant på banvallen.

Två olika halveringstider för imazapyr har tagits fram av Almqvist (2004) för provplats 760 vid Ina. Mellan 0 och 153 dagar var halveringstiden 58 dagar och mellan 154 och 1 954 dagar var halveringstiden 1 369 dagar. I simuleringsmodellen avser halveringstiden biologisk nedbrytning men inga nedbrytningsprodukter betraktas utan räknas istället som en massförlust.

Tabell 3-2 Sammanställning av material och materialegenskaper för simulering av imazapyr (Almqvist, 2004; Vectura, 2011b. Modifierad). För *effektiv porositet, vattenhalt, densitet, volym GV-akvifär, $t_{1/2}$, molekylvikt, dos imazapyr vid besprutning* samt för *partikelproduktion* ges en diskret fördelning. K_d , *imazapyr* representerar en triangulär fördelning. En uniform fördelning ges för K_d , *partiklar*.

Modell-deldomän	Material	Parameter	Värde			Enhet
Bank 0-1 m	Bankmaterial	Effektiv porositet	0,32			-
		Vattenhalt	0,2			-
		Densitet	1 800			kg/m ³
Akvifär 1 m -	Akvifärjord	Effektiv porositet	0,32			-
		Vattenhalt	1			-
		Densitet	1 800			kg/m ³
			Min	Troligast	Max	
Bank 0,0-0,1 m	Bankmaterial	K_d , imazapyr	0,665	6,65	66,5	cm ³ /g
Bank 0,1-0,2 m	Bankmaterial		0,59	5,9	59	
Bank 0,2-0,3 m	Bankmaterial		0,505	5,05	50,5	
Bank 0,3-0,4 m	Bankmaterial		0,46	4,6	46	
Bank 0,4-0,5 m	Bankmaterial		0,235	2,35	23,5	
Bank 0,5-0,6 m	Bankmaterial		0,27	2,7	27	
Bank 0,6-0,7 m	Bankmaterial		0,3	3	30	
Bank 0,7-0,8 m	Bankmaterial		0,425	4,25	42,5	
Bank 0,8-0,9 m	Bankmaterial		0,805	8,05	80,5	
Bank 0,9-1,0 m	Bankmaterial		1,24	12,4	124	
Akvifär	Akvifärjord	K_d , akvifärjord	0,16	1,55	15,5	
		Volym	100			m ³
Bank 0,0-1,0 m	Partiklar	K_d , partiklar	10	1 000		cm ³ /g
			t<153 dygn	t>153 dygn		
Bank och vatten 0,0-1,0 m	Imazapyr	$t_{1/2}$	58	1 369		dygn
	Imazapyr	Molekylvikt	229			g/mol
	Susp	Molekylvikt	1			g/mol
	Imazapyr	Dos vid besprutning	1,5			kg/ha
Banköveryta	Partiklar	Partikelproduktion	0,45			µg/m/dygn

3.5.3 Modellparametrisering, glyfosat

För att kunna göra simuleringar med bekämpningsmedlet glyfosat har vissa parametrar ändrats i modellen, se tabell 3-3.

Tabell 3-3. Parametervärden för glyfosat och AMPA i den parametriserade glyfosatmodellen (Almqvist 2004, Torstensson 2005, Golder 2008, Vectura 2011b, Cederlund, pers. medd., 2012a).

Modell-deldomän	Material	Parameter	Värde	Enhet	Fördelning	
Bank 0-1 m	Bankmaterial	Effektiv porositet	0,32	-	Diskret	
		Vattenhalt	0,2	-	Diskret	
		Densitet	1 800	kg/m ³	Diskret	
Akvifär 1 m -	Akvifärjord	Effektiv porositet	0,32	-	Diskret	
		Vattenhalt	1	-	Diskret	
		Densitet	1 800	kg/m ³	Diskret	
Bank 0,0-1,0 m	Bankmaterial	K _{d, glyfosat}	Min	15	l/kg	Uniform
			Max	104	l/kg	Uniform
		K _{d, AMPA}	Min	1,5	l/kg	Uniform
			Max	10,4	l/kg	Uniform
Bank 0,0-1,0 m	Partiklar	K _{d, partiklar}	Min	10	cm ³ /g	Diskret
			Max	1 000	cm ³ /g	Diskret
Akvifär	Akvifärjord	K _{d, akvifärjord}	Min	1,5	cm ³ /g	Uniform
			Max	10,4	cm ³ /g	Uniform
Bank och vatten 0,0-1,0 m	Glyfosat	t _{1/2}	Min	24	dygn	Uniform
			Max	242	dygn	Uniform
	AMPA		Min	124,1	dygn	Uniform
			Max	489,1	dygn	Uniform
	Glyfosat	Molekylvikt		229	g/mol	Diskret
	AMPA			97,022	g/mol	Diskret
Susp			1	g/mol	Diskret	
Banköveryta	Glyfosat	Dos vid besprutning	1,8	kg/ha	Diskret	
	Partiklar	Partikelproduktion	0,45	µg/m ² /dygn	Diskret	

Halveringstiden är annorlunda initierad i glyfosatmodellen än mot imazapyrmodellen. Nämligen att den slumpas mellan ett minsta värde och ett högsta värde. Detta gäller både för glyfosat och för nedbrytningsprodukten AMPA. I modellen bryts glyfosat ned till AMPA medan eventuella nedbrytningsprodukter av AMPA betraktas som en massförlust.

De K_d-värden som används i glyfosatmodellen har en uniform fördelning med ett max- och ett min-värde, istället för triangulär som i imazapyrmodellen. De K_d-värden som används har tagits fram genom tester i laboratorie (Cederlund, pers. medd., 2012a) men inga uppmätta K_d-värden finns för aktuella platser varför detta angreppssätt valts. En uniform fördelning används för att fånga upp variabiliteten i parametern.

3.5.4 Nederbörd och temperatur

Nederbördsdata och temperaturdata har hämtats från SMHI (SMHI, 2012) så nära de aktuella platserna som möjligt. Data från Söderhamn och Bergvik användes för simulering av imazapyr och data från Malmö användes för simulering av glyfosat. Anledningen till detta är att det finns flest mätdata av glyfosat från Skörpinge som ligger relativt nära Malmö.

I modellen är nederbörden som faller på banvallen den vattenmassa som rör sig nedåt i banvallsprofilen som ett jämnt fördelat omättat pluggflöde. Nederbörden ger då en direkt respons utan fördröjning. Hela vattenvolymen förflyttas nedåt utan någon blandning mellan de tio olika cellerna (skikten) och hamnar tillslut i boxen *Grundvatten* (se figur 3-12). I grundvattnet i modellen späds föroreningen ut i angiven volym. Temperaturen spelar in då nederbörden anses vara noll vid temperaturer under 0 °C vilket gör att ingen snöackumulation sker på banvallen.

3.5.5 Antaganden

Följande antaganden har gjorts i spridningsmodellen:

- Endast vertikalt flöde av vatten, partiklar och bekämpningsmedel inom modelldomänen.
- Endast flöde om lufttemperaturen är större än 0°C. Detta gör att det inte sker någon ackumulation av snö på banvallen varför inte heller smältvatten finns med i beräkningarna.
- Ett jämnt fördelat pluggflöde antas ske vilket betyder att nederbörden ger en direkt respons utan fördröjning av det omättade vattenflödet.
- Evaporation från banvallens grova material har ansetts vara försumbar på grund av dess icke-kapillära egenskaper.
- Vattenhalten, antas vara 0,2 i banvallens material då det sker ett vattenflöde genom domänen, annars 0.
- Tillskottet av finkorniga partiklar har beräknats till 0,45 µg/m²/d av Almqvist (2004) och antas vara noll i banvallen från $t = 0$ för att sedan öka konstant med tiden.
- $K_{d, \text{partiklar}}$ antas vara 10 gånger större än $K_{d, \text{min}}$ och $K_{d, \text{max}}$ för bankfyllningen för alla tre substanserna imazapyr, glyfosat och AMPA.
- $K_{d, \text{akvifärjord}}$ antas vara 10 gånger mindre än $K_{d, \text{min}}$ och $K_{d, \text{max}}$ för bankfyllningen för alla tre substanserna imazapyr, glyfosat och AMPA.
- Finkorniga partiklar transporteras med vatten utan att fastläggning till grovkornigt material sker. Ett så kallat filterskikt (där finare partiklar kan samlas) antas finnas djupare än 0,6 m ner i bankmaterialet, varför det inte studerats i detta arbete.

3.5.6 Sannolikhetsbaserad metodik

Monte Carlo-simuleringsmetodik används i GoldSim för att ta hänsyn till osäkerheter. Parametervärdena från tabell 3-2, som har uniform eller triangulär form, väljs slumpvis inför varje simuleringskörning. 1 000 Monte-Carlo-simuleringar (realiseringar) körs

vilket ger en stor uppsättning resultat som bygger på olika ingångsparametrar. Modellen bearbetar slutligen resultaten statistiskt och de presenteras i sannolikhetsfördelningar med medelvärde, medianvärde, största och minsta resultat samt för percentilerna 5, 25, 75 samt 95 %.

3.6 KÄNSLIGHETSANALYS AV IMAZAPYRMODELL

En känslighetsanalys har utförts på modellen för att verifiera vilka parametrar som är extra känsliga och då spelar stor roll för slutresultatet. För att göra detta har känslighetsindex β använts, se ekvation 4 (Lankreijer, 1998). β är den relativa avvikelser i simuleringsvärdet genom den relativa avvikelser i parametervärdet. Då β är dimensionslös blir det möjligt att jämföra de olika parametrarna med avseende på känslighet i simuleringsmodellen.

$$\beta = \frac{\frac{x_1 - x_0}{x_0}}{\frac{p_1 - p_0}{p_0}} \quad (4)$$

där x_1 är det simulerade värdet (massa imazapyr i banvallen eller imazapyr-koncentration i grundvattnet) vid den ändrade parametern p_1 och x_0 är det simulerade värdet vid referensparametern p_0 . En ändring i parametern p kommer att generera en direkt proportionell ändring i det simulerade värdet x när $\beta = 1$.

De olika parametrarna *avstånd till grundvattenytan, partikelproduktion, grundvattenvolym, nederbörd, dos imazapyr, Kd-värde* i banvall samt *halveringstid* testades genom att öka och minska parametrarnas värde med 30 respektive 60 %.

Beroende på hur parametrarna ställts in innan modellen testas med denna metod måste det beräknade β betraktas som ett genomsnitt för alla parameterinställningar. Detta medför att känslighetsanalysen kan ge en missvisande bild om hur det är så känsligheten kan variera beroende på hur parametrarna är satta innan testet. Det beräknade β är även ett medelvärde av de olika beräknade β för en minskning med 30 och 60 % på varje parameter från gällande parameterinställning, samt för en ökning med 30 och 60 % på varje parameterinställning. Efter det har ett absolutbelopp beräknats.

3.7 OPTIMERING AV IMAZAPYRMODELLEN

För att kunna optimera modellen beräknades variansen mellan uppmätta och simulerade medelvärden för varje parameterändring. Vid det lägsta värdet uppstår ett optimum och parametervärdet har justerats därefter. Variansen beräknas enligt formel 5.

$$\sigma^2 = \sum_{t=1}^N \frac{(y_{\text{obs}}(t) - y_{\text{sim}}(t))^2}{N-1} \quad (5)$$

där y_{obs} är det observerade värdet och y_{sim} är det simulerade värdet. $N = 2267$ antal dagar/simuleringar.

3.8 EFFEKTIVITETSTEST AV IMAZAPYRMODELL

För att kontrollera och utvärdera hur pass bra modellen följer de uppmätta värdena har Nash and Sutcliffe-metoden (R_{eff}) använts enligt formel 6 (Montanari, 2005). Ett värde på R_{eff} så nära ett som möjligt är önskvärt då detta indikerar en bra modell. Då $R_{\text{eff}} =$

1 stämmer modellens utdata precis med uppmätt data. Ett R_{eff} som är noll eller negativt visar att modellen inte ger en bättre estimering än vad ett medelvärde på själva mätningarna hade varit.

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (y_{obs}(t) - y_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^N (y_{obs}(t) - y_m)^2} \quad (6)$$

Där y_{obs} är det observerade värdet, y_{sim} är det simulerade värdet och y_m är medelvärdet av de uppmätta värdena. $N = 2\,267$ antal dagar där lika stor vikt läggs på alla observationer oberoende av provtagningsdjup och provtagningsdatum.

3.9 STATISTISKT BEARBETING AV IMAZAPYRMODELL

För att utvärdera modellen statistiskt redovisas simuleringsresultaten som sannolikhetsfördelningar med de valda percentilerna 5, 25, 75 samt 95 %. För att även säkerställa att modellen simulerar värden kring de uppmätta värdena undersöks huruvida de uppmätta värdena ligger inom intervallet 5 percentilen samt 95 percentilen. Om de uppmätta värdena ligger inom detta intervall är modellen en bra estimering.

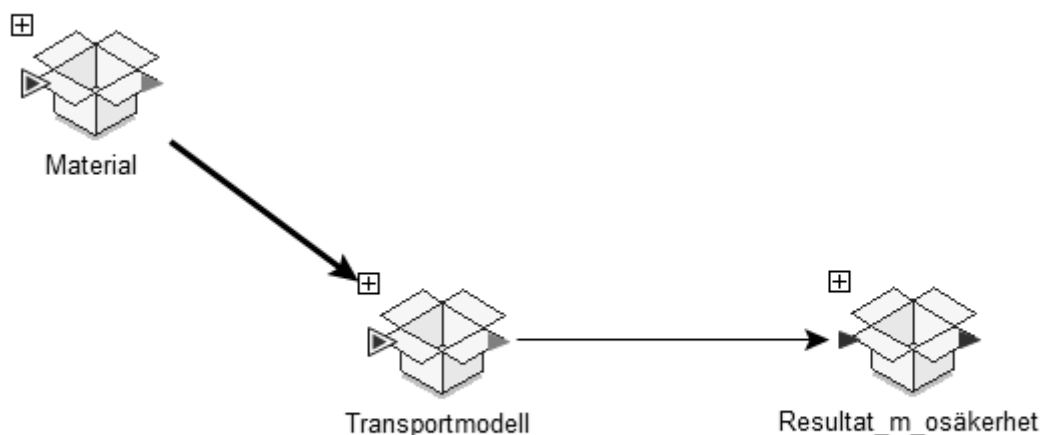
4. RESULTAT

Nedan presenteras hur modellen är uppbyggd i simuleringsprogrammet GoldSim, vilka ändringar som gjorts för att optimera modellen, vilka som är modellens känsliga parametrar samt hur modellen bearbetats statistiskt. Här redovisas även resultaten från simuleringarna, både för imazapyr och för glyfosat och dess nedbrytningsprodukt AMPA.

4.1 MODELLUPPBYGGNAD OCH MODELLUTVECKLING AV IMAZAPYRMODELL

Innan simuleringar kunde påbörjas har den befintliga modellen kontrollerats och utvecklats. Ändringar och förbättringar av den befintliga modellen har till största del gjorts vid själva begynnelsevillkoret för dosen imazapyr i det översta banvallsskiktet samt i själva *transportmodellen*. Istället för en pulsinjektion av dosen imazapyr som beror av tiden (vilket inte är tillåtet i GoldSim då dosen kumulativt minskar med tiden) gjordes ett begynnelsevillkor där dosen imazapyr sattes till 1,5 kg/ha vid $t = 0$ och vid markytan. I *transportmodellen* har strukturen gjorts om och fler resultatgrafer har skapats. Även beräkningen av koncentrationen av imazapyr i grundvattnet har gjorts om då inga halter gick att simulera fram med befintlig metod. Metoden som fanns i modellen från början tog endast hänsyn till löst imazapyr i grundvattnet medan den nu representerar den totala koncentrationen, alltså hela massan imazapyr, löst och partikelbundet.

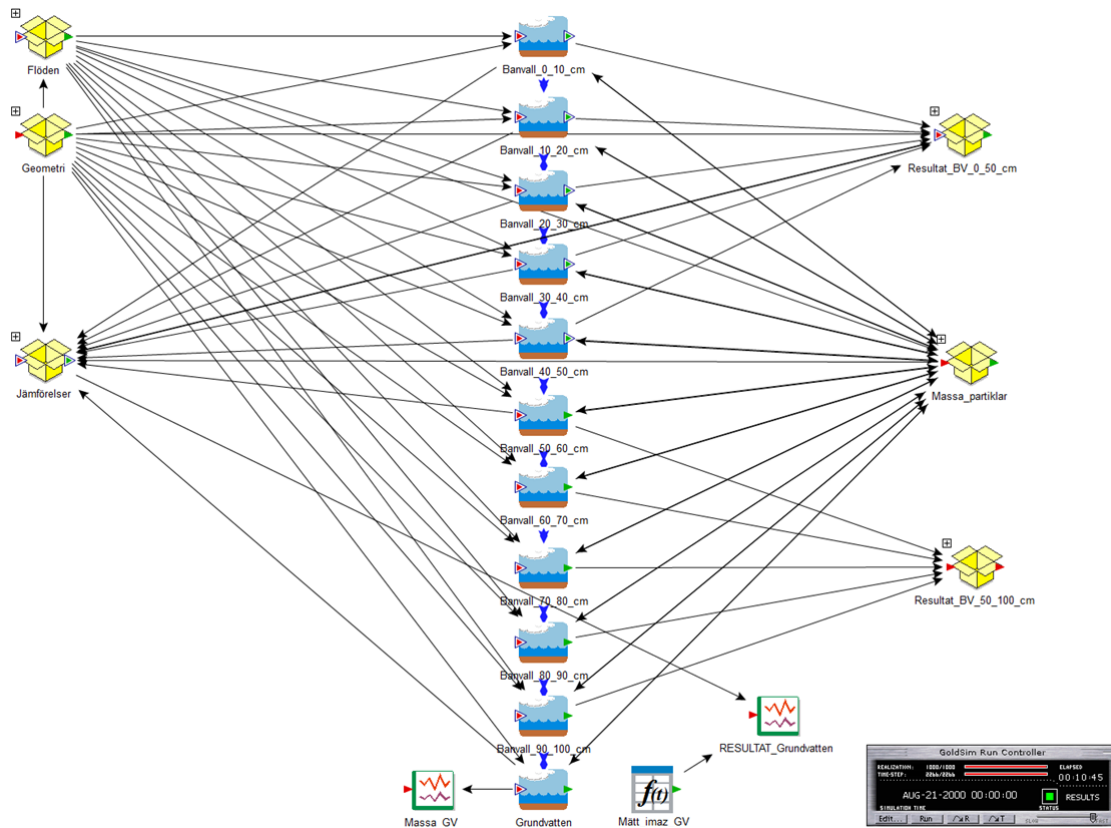
Simuleringsmodellen i stort är uppbyggd i tre olika boxar; *material*, *transportmodell* samt *resultat med osäkerhet*, se figur 4-1.



Figur 4-1. Modellens uppbyggnad i GoldSim med boxarna *material*, *transportmodell* samt *resultat med osäkerhet*.

I boxen *material* finns parametrarna halveringstid, K_d -värden för bankfyllning, akvifärjord samt partiklar, effektiv porositet, densitet samt diffusivitet. Alla dessa parametrar fördelas på bankfyllningen. För uppbyggnad i modell se bilaga C.

I boxen *transportmodell* återfinns själva modellen där herbicidtransporten sker, se figur 4-2. I denna box finns fler parametrar som påverkar själva banvallen, såsom flöden, geometrin på banvallen och akvifären samt partikelmassan. Uppställningen för flöden, geometrin samt partikelmassa kan ses i bilaga C där även en översikt av transporten från översta skiktet (0-10 cm) ned till det andra skiktet (10-20 cm) kan betraktas. Resultaten av simuleringarna redovisas i nästkommande avsnitt, 4.2 *Simuleringar med imazapyr*.



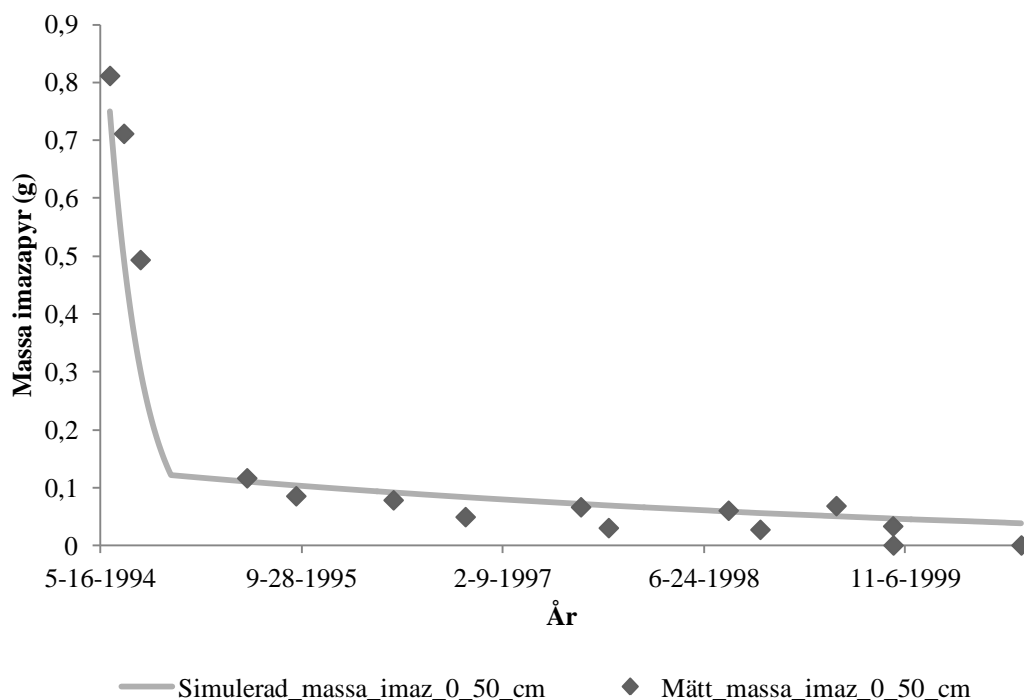
Figur 4-2. Transportmodell i GoldSim för imazapyr.

Den sista boxen i modellen redovisar resultat med angivna osäkerheter. Uppställningen för detta kan ses i bilaga C.

4.2 SIMULERING MED IMAZAPYR

Simuleringar med den aktiva substansen imazapyr gjordes för perioden 1994-06-08 till 2000-08-21 med sammanlagt 2 266 antal tidssteg och med 1 000 Monte-Carlorealiseringar. Det är under denna tidsperiod som det finns uppmätta värden av imazapyr i bankmaterialet och i grundvattnet från mätplatsen Ina utanför Söderhamn. Applicering av imazapyr var 1,5 kg/ha vid $t = 0$.

Då det endast finns uppmätta värden från banvallens översta 50 cm redovisas simulerad mängd imazapyr (g) summerad över skikten 0 – 50 cm i banvallen, se figur 4-3. Nedbrytning sker även i underliggande skikt ned till grundvattnet (50 – 100 cm).



Figur 4-3. Mängd imazapyr (g) summerad över skikten 0-50 cm enligt mätning (punkter) och enligt simulering (linje).

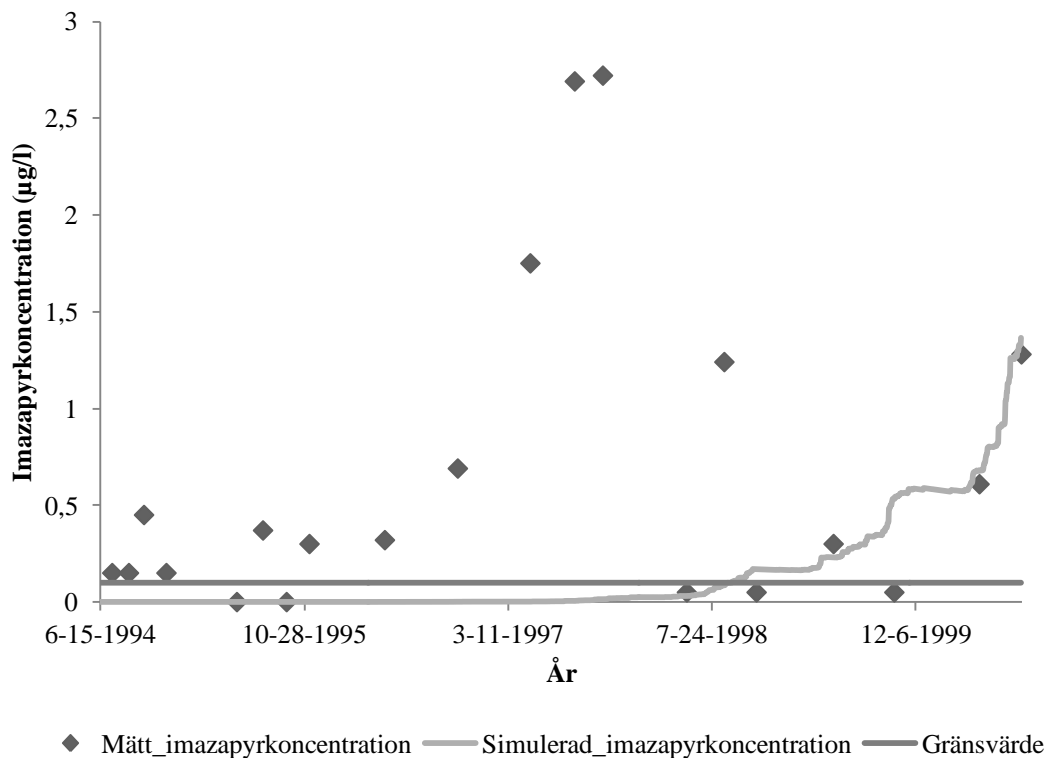
Grafen visar en relativt snabb avklingning av imazapyr i de översta 50 cm i banvallen det första året för att sedan plana ut de sista fem åren. Den röda linjen som representerar de simulerade halterna för imazapyr i banvallen ser ut att följa de uppmätta värdena (punkter) bra. För denna anpassning har parametrarna justerats enligt tabell 3-2. För resultat av simuleringar skikt för skikt de första 50 cm, se bilaga D. I bilaga D kan även massan imazapyr i bankmaterialet skikt för skikt med angiven osäkerhet i simuleringresultatet från Monte-Carlorealiseringarna granskas.

Koncentrationen imazapyr i grundvattnet har i modellen beräknats enligt formel 7.

$$C_{imaz} = \frac{Grundvatten.Mass_in_Pathway[Imazapyr]}{Volym_grundvattenakvifär} \quad (7)$$

Där *Grundvatten.Mass_in_Pathway[Imazapyr]* representeras av den totala massan imazapyr som rört sig genom de tio skikten (0 – 100 cm) för att slutligen nå grundvattnet.

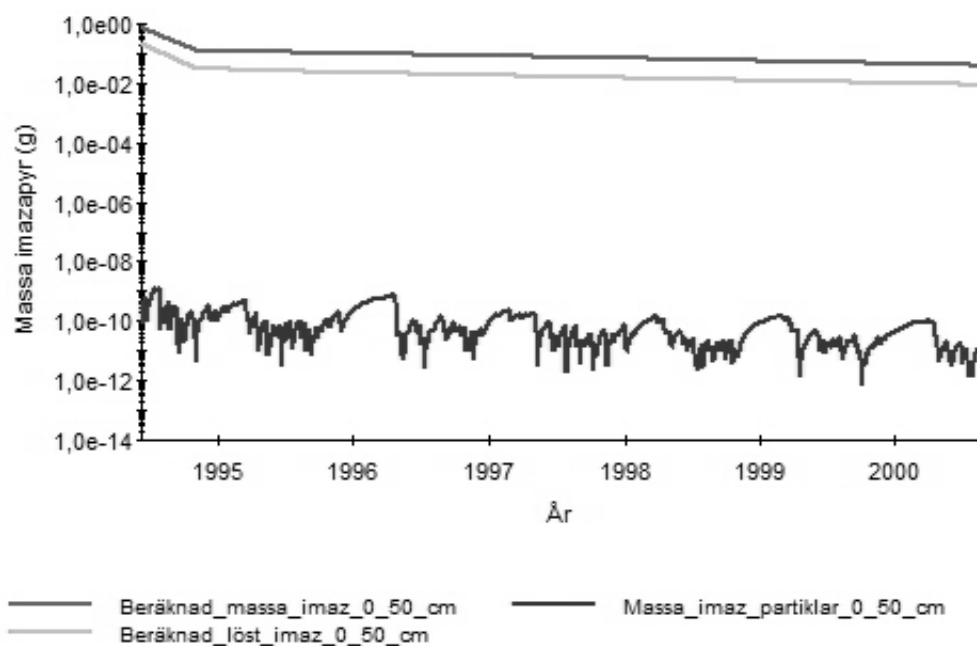
I figur 4-4 redovisas simuleringresultat samt uppmätta värden för koncentrationen imazapyr ($\mu\text{g/l}$) i grundvattnet. Från den sista *boxen* i modellen som representerar grundvattenvolymen sker inget utflöde varför allt som inte brutits ned på väg ner genom banvallen tillslut hamnar i denna cell. Modellen tar alltså inte hänsyn till någon grundvattenomsättning.



Figur 4-4. Imazapyrkoncentration i grundvattnet enligt simulering (ljusgrå linje) och enligt mätning (punkter). Mörkgrå linje visar gränsvärdet (0,1µg/l) för tillåten halt i grundvattnet (enligt dricksvattenkungörelsen). Simuleringen överensstämmer med uppmätta värden av imazapyr endast i slutet av simuleringsperioden.

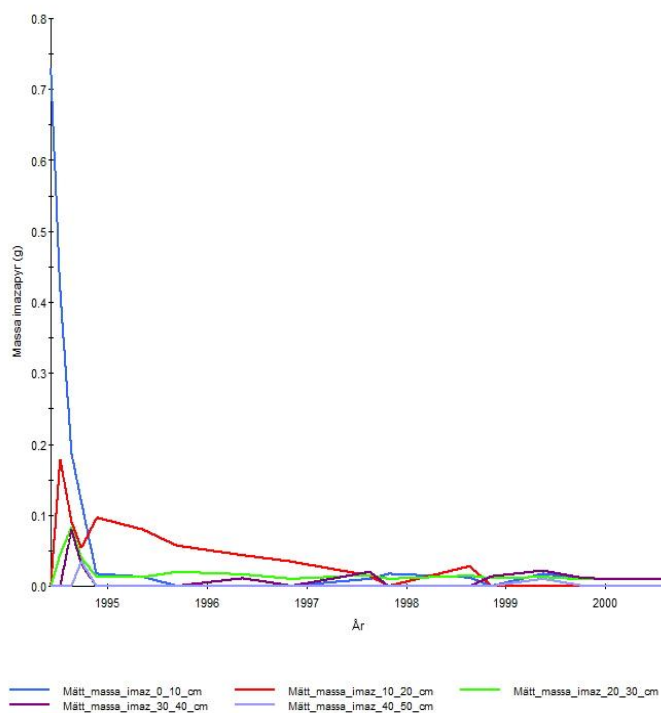
Figuren visar att de simulerade värdena (ljusgrå linje) endast överensstämmer med uppmätta värden av imazapyr (punkter) i slutet av simuleringsperioden. För denna anpassning har parametrarna justerats enligt tabell 3-2 med undantag för grundvattenvolymen som ändrades från 100 m³ (100 000 l) till 0,0031 m³ (3,1 l). Detta orimligt låga värde kommer att diskuteras närmre i kapitel 5. *Diskussion*. Simulerad mängd imazapyr i grundvattnet med angiven osäkerhet från Monte-Carlorealiseringarna kan studeras i bilaga D.

Det sker i princip ingen adsorption till partiklarna enligt simuleringar, se figur 4-5. Observera att grafen visar logaritmiska värden på y-axeln. Massa imazapyr adsorberad till bankmaterialet och massa imazapyr i lös fas kan också studeras i figur 4-5.



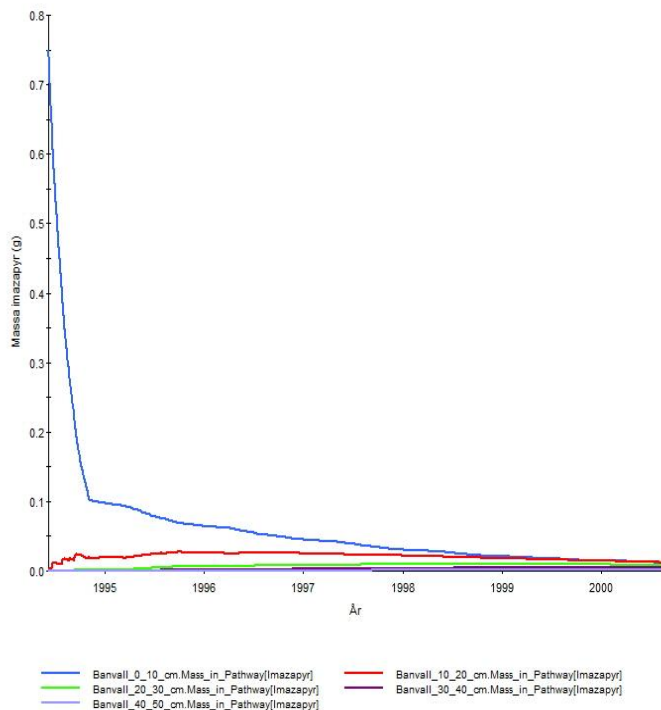
Figur 4-5. Massa imazapyr (g) adsorberad till bankmaterialet (blå linje) i de översta 50 cm i banvallen respektive partiklar (röd linje), samt i löst fas (grön linje). Observera att grafen visar logaritmiska värden på y-axeln.

Den högsta uppmätta mängden imazapyr hittas i de översta 10 cm i banvallsskiktet (figur 4-6), för att sedan visa höga värden i skiktet 10 – 20 cm.



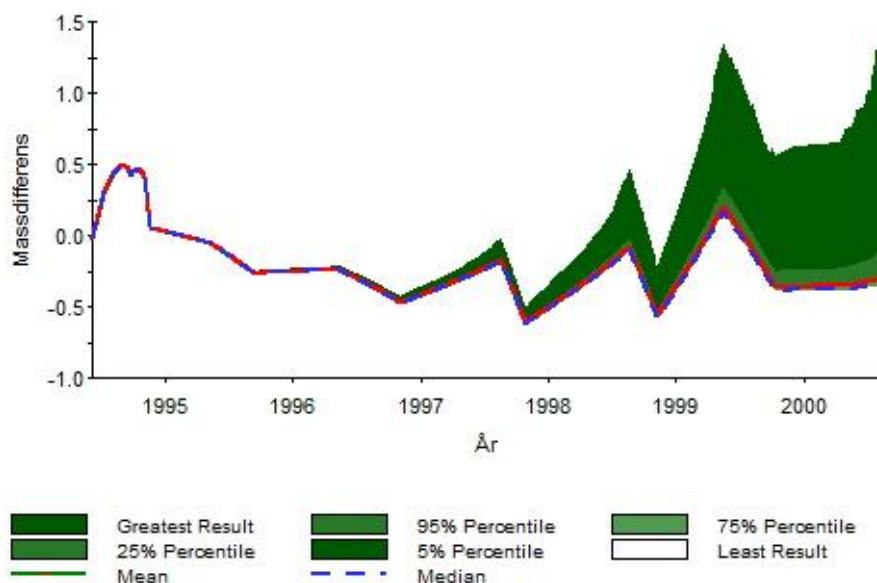
Figur 4-6. Genombrottskurvor för uppmätt massa imazapyr (g) i de översta 50 cm i banvallen.

I figuren med genombrottskurvor för simulerad massa imazapyr (figur 4-7) kan observeras att den högsta mängden hittas i de översta 10 cm i banvallsskiktet. I resterande skikt är simulerad mängd relativt liten.



Figur 4-7. Genombrottskurvor för simulerad massa imazapyr (g) i de översta 50 cm i banvallen.

Massdifferensen vid simulering ökar från år 1997 fram till sista simuleringsdatumet under år 2000 (figur 4-8). Detta kan innebära att massförlusten baseras på nedbrytning av imazapyr.



Figur 4-8. Uträknad massdifferens för simulering med imazapyr i de översta 50 cm i banvallen. Röd linje visar medelvärdet.

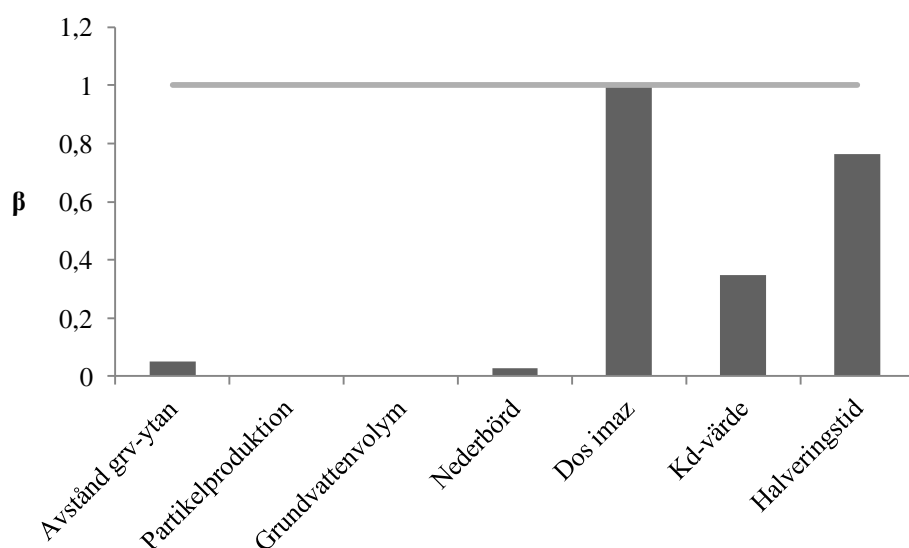
4.3 ANALYSER AV IMAZAPYRMODELL

Imazapyrmodellen har analyserats genom att:

- undersöka dess känslighet
- kontrollera om modellen kan optimeras
- effektivitetstestas
- statistiskt säkerställa modellen

4.3.1 Känslighetsanalys av imazapyrmodell

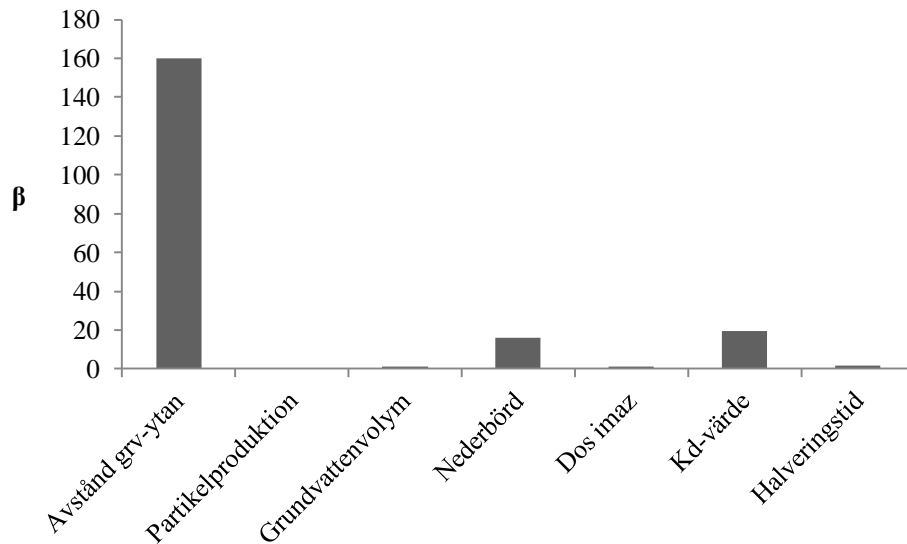
En känslighetsanalys har utförts på modellen för att verifiera vilka parametrar som är känsliga och då spelar roll för slutresultatet. Känslighetsindex β har använts enligt formel 4 där ett stort värde på β innebär att parametern är mycket känslig för förändring. Resultatet för β i massa imazapyr i banvallen presenteras i figur 4-9.



Figur 4-9. Känslighetsindex β för massa imazapyr i banvallen för de olika parametrarna *avstånd till grundvattenytan*, *partikelproduktion*, *grundvattenvolym*, *nederbörd*, *dos imazapyr*, *Kd-värde* i banvall samt *halveringstid* (staplar). Den ljusgrå linjen representeras av $\beta = 1$ vilket innebär att en ändring i parametern p kommer att generera en direkt proportionell ändring i den simulerade massan x i banvallen.

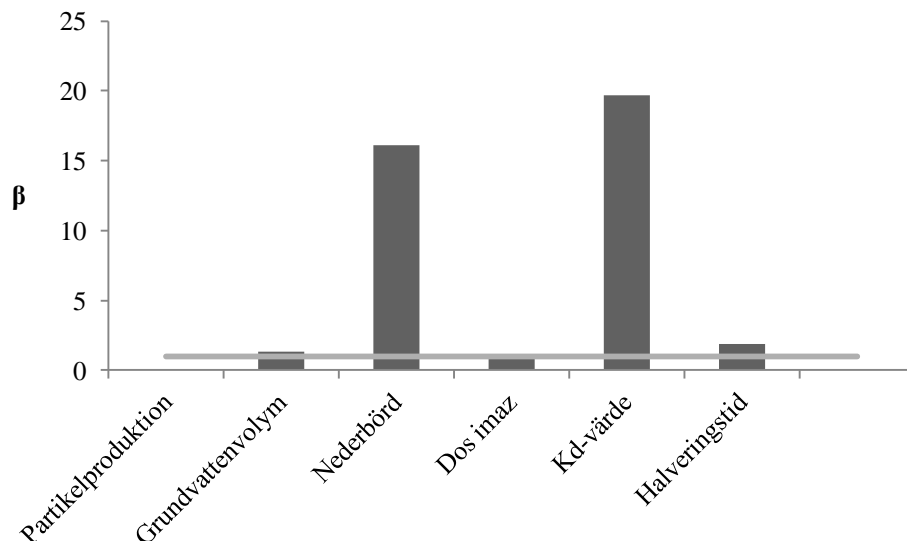
I figur 4-9 kan utläsas att dosen imazapyr är direkt proportionell mot förändringen av massan av imazapyr i bankmaterialet. Parametrarna *halveringstid* samt *Kd-värde* har betydelse i modellens simuleringsresultat av massa imazapyr i banvallen. *Avstånd till grundvattenytan* och *nederbörd* har mycket liten betydelse medan *partikelproduktion* och *grundvattenvolym* inte visar någon känslighet enligt denna känslighetsanalys.

I figur 4-10 presenteras resultatet för β i koncentration imazapyr i grundvattnet.



Figur 4-10. Känslighetsindex β för koncentrationen imazapyr i grundvattnet för de olika parametrarna *avstånd till grundvattenytan*, *partikelproduktion*, *grundvattenvolym*, *nederbörd*, *dos imazapyr*, *Kd-värde* i banvall samt *halveringstid*.

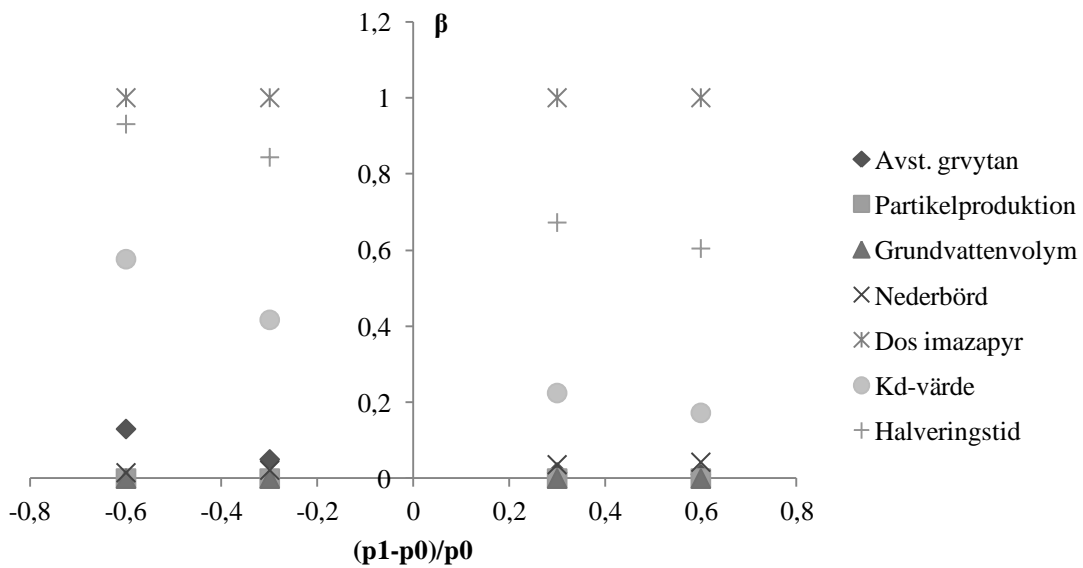
Då parametern *avstånd till grundvattenytan* ger ett så pass högt värde visas även resultatet för β i grundvattnet i en tabell utan denna parameter, se figur 4-11. Det höga β -värdet vid ändring av parametern *avstånd till grundvattenytan* visar att denna parameter är mycket känslig vid ändring av parametervärdet vad gällande koncentration imazapyr i grundvattnet. Alltså att en liten ökning av avståndet till grundvattenytan kommer generera stor ökning av imazapyrkoncentrationen i grundvattnet.



Figur 4-11. Känslighetsindex β för koncentrationen imazapyr i grundvattnet för de olika parametrarna, *partikelproduktion*, *grundvattenvolym*, *nederbörd*, *dos imazapyr*, *Kd-värde* i banvall samt *halveringstid* (staplar). Den ljusgrå linjen representeras av $\beta = 1$ vilket innebär att en ändring av de olika parametrarna kommer att generera en direkt proportionell ändring i simulerade halter i grundvattnet.

I figuren kan utläsas att K_d -värdet i banvallen samt *nederbörden* har störst inverkan av de olika testade parametrarna för koncentrationen imazapyr i grundvattnet. Även en ändring av parametrarna *halveringstid* och *grundvattenvolym* ger ett högt β vilket indikerar på känsliga parametrar. *Dosen imazapyr* är direkt proportionerlig med förändringen av koncentrationen av imazapyr i grundvattnet, detta då $\beta = 1$. *Partikelproduktionen* har ingen inverkan enligt denna känslighetsanalys, då $\beta = 0$.

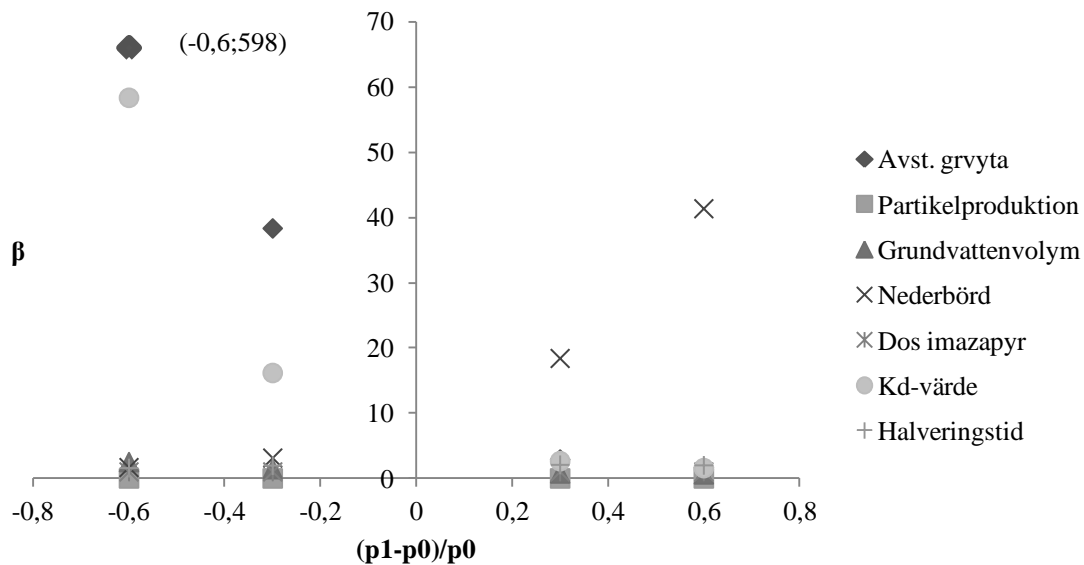
För att kunna visa en relativ förändring har β även plottats mot $(p_1 - p_0)/p_0$. Detta gör att alla parameterkörningar kan jämföras mot β i ett och samma diagram. För den relativa förändringen i banvallen se figur 4-12.



Figur 4-12. Relativ förändring av β (med avseende på simulerad massa imazapyr i banvallen) vid en ändring av de olika parametrarna *avstånd till grundvattenytan*, *partikelproduktion*, *grundvattenvolym*, *nederbörd*, *dos imazapyr*, *Kd-värde* i banvall samt *halveringstid*.

I figuren kan ses att parametern *dos imazapyr* är direkt proportionell mot en förändring av koncentrationen i banvallen, detta då $\beta = 1$. Parametrarna *halveringstid* samt *Kd-värde* indikerar på att låga värden av parametrarna ($p_1 < p_0$) genererar ett större β , alltså att dessa parametrar blir känsligare vid lägre värden på aktuell parameter. *Avstånd till grundvattenytan* har en marginell påverkan, precis som parametrarna *partikelproduktion*, *grundvattenvolym* samt *nederbörd*.

För förändringen i grundvattnet ger parametern *avstånd till grundvattenytan* högt β , större vid små värden än för stora, se figur 4-13. Detta indikerar att systemet inte hinner bryta ned allt imazapyr innan det når grundvattnet, varför denna parameter blir känslig vid små värden.



Figur 4-13. Relativ förändring av β (med avseende på simulerad koncentration imazapyr i grundvattnet) vid en ändring av de olika parametrarna *avstånd till grundvattenytan*, *partikelproduktion*, *grundvattenvolym*, *nederbörd*, *dos imazapyr*, *Kd-värde* i banvall samt *halveringstid*. Parametern *avstånd till grundvattenytan* har en "outlier" som representeras av den större punkten (-0,6;598).

Figuren visar att en förändring av parametern *Kd-värde* genererar en hög känslighet, precis som parametern *nederbörd*. Dock är låga *Kd*-värden känsligare än höga i motsats till *nederbörd* där höga värden genererar en större ändring av koncentrationen i grundvattnet. Parametrarna *partikelproduktion*, *grundvattenvolym* samt *halveringstid* har alla (i princip) en direkt proportionell förändring mot koncentrationen, detta då β ligger nära värdet 1.

4.3.2 Optimering av imazapyrmodell

För att kunna optimera modellen har variansen beräknats enligt formel 5 mellan uppmätta och simulerade medelvärden för varje parameterändring. Genom att justera de olika parametervärdena *avstånd till grundvattenytan*, *partikelproduktion*, *grundvattenvolym*, *nederbörd*, *dos imazapyr*, *Kd-värde* i banvallen samt *halveringstid* så att så låga värden på variansen som möjligt uppnås fås även den minsta variansen, alltså ett optimum. Den parameter som har ändrats är grundvattenvolymen, från 100 m^3 (100 000 l) till $0,0031 \text{ m}^3$ (3,1 l). Detta orimligt låga värde på grundvattenvolymen diskuteras i kapitel 5. *Diskussion*.

4.3.3 Effektivitetstest på imazapyrmodell

R_{eff} -metoden använts enligt formel 6 för att utvärdera modellens effektivitet. Effektiviteten för modellen i banvallens översta 50 cm beräknades till -85. Då modellen grafiskt ser ut att vara effektiv, dvs simuleringen passar de uppmätta värdena väl, se figur 4-3, beräknades även effektiviteten per år. Detta för att eventuellt kunna urskilja när under tidsperioden modellen stämmer bra och när den inte gör det, se tabell 4-1.

Tabell 4-1. Modellens effektivitet i banvallens översta 50 cm beräknat per år. $R_{eff} = 1$ innebär en perfekt anpassning av modellen. Observera att simuleringar påbörjades först den 6 juni 1994 och avslutades den 21 augusti 2000, vilket gör att 1994 och år 2000 inte representerar ett helt år.

År	R_{eff}
1994	0,88
1995	-530
1996	-1,98
1997	0,38
1998	0,75
1999	0,93
2000	0,93

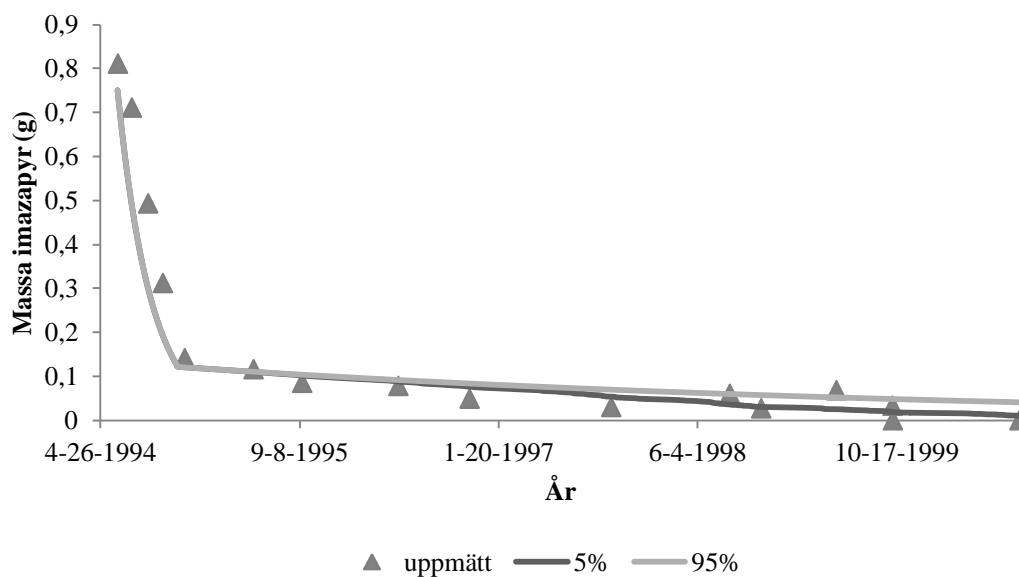
Av beräknade R_{eff} -värden år för år kan det konstateras att modellen är mest effektiv i början och i slutet av simuleringsperioden, alltså år 1994 samt år 1999 och 2000. Sämst är modellens effektivitet under år 1995.

I grundvattnet beräknades inte modellens effektivitet då simulerade och uppmätta värden skiljer sig för mycket, se figur 4-4. Endast i slutet av simuleringstiden uppvisas simulerad koncentration imazapyr. Toppen av uppmätta värden mellan år 1997 och 1998 uppnås aldrig med simulerade värden. Ett effektivitetsvärde på detta hade gett en alldeles för dåligt resultat.

4.3.4 Statistisk bearbetning av imazapyrmodell

Modellen har bearbetats statistiskt genom att presentera simuleringsresultaten som sannolikhetsfördelningar med percentilerna 5, 25, 75 samt 95 %. Simuleringsresultaten med angiven osäkerhet för varje skikt ner till 50 cm redovisas i bilaga D.

För att säkerställa att modellen simulerar värden kring de uppmätta värdena för imazapyr i de översta 50 cm i banvallen, undersöktes om dessa värden låg i intervallet för den 5:e och 95:e percentilen, se figur 4-14. Om de uppmätta värdena ligger inom intervallet kan man säga att modellen med 90 % säkerhet visar riktiga värden.

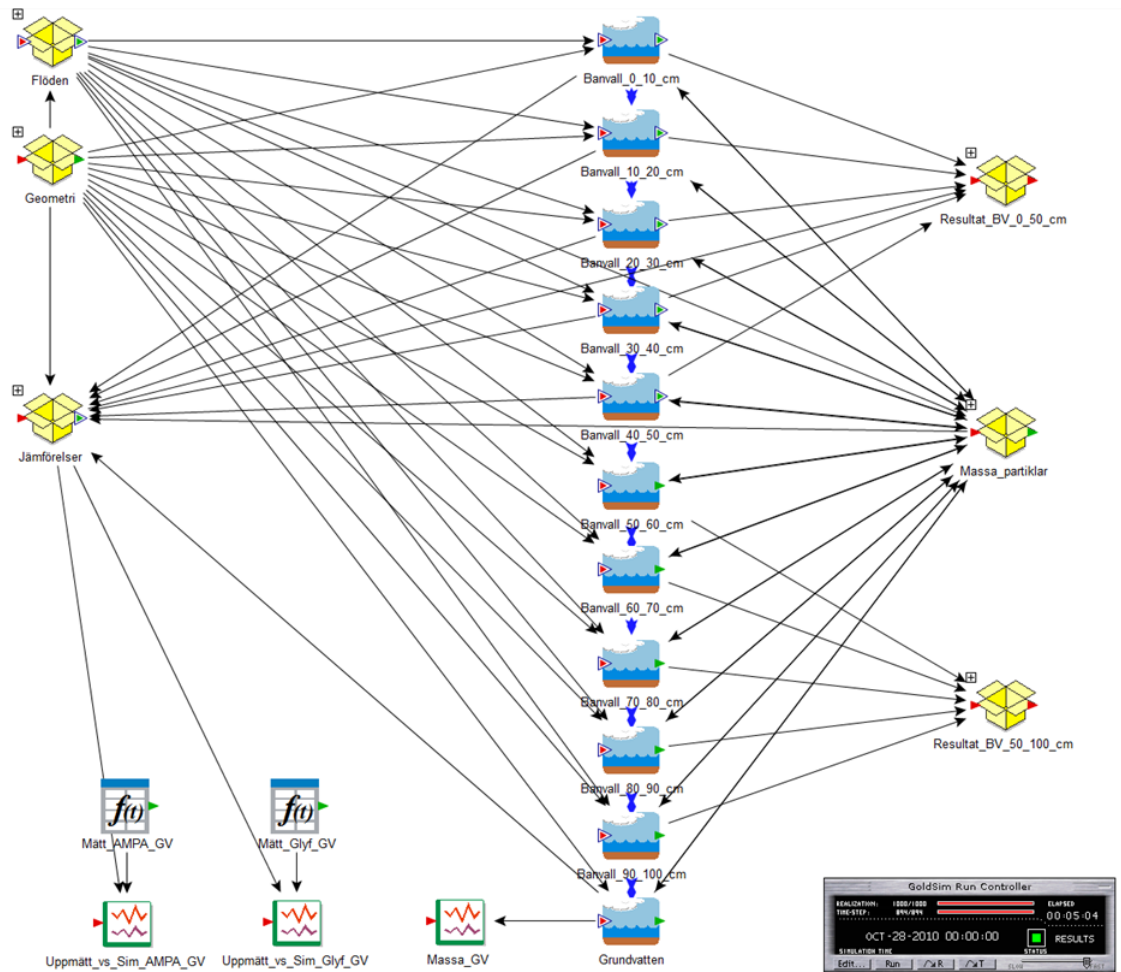


Figur 4-14. Uppmätt massa imazapyr (punkter) med percentilerna 5 % (mörkgrå linje) samt 95 % (ljusgrå linje) för de simulerade värdena för imazapyr i de översta 50 cm i banvallen. Om modellen simulerar bra/riktiga värden ska punkterna för uppmätt massa ligga inom detta intervall.

GoldSim simulerar inget osäkerhetsspann från simuleringens start fram till cirka år 1996. Först efter 1996 syns 5:e percentilen och 95:e percentilen. De uppmätta värdena ser inte ut att ligga inom detta intervall. Vid studier av skikt för skikt verkar dock uppmätta värden ligga inom detta intervall, se bilaga D.

4.4 MODELLUPPBYGGNAD OCH MODELLUTVECKLING AV GLYFOSATMODELL

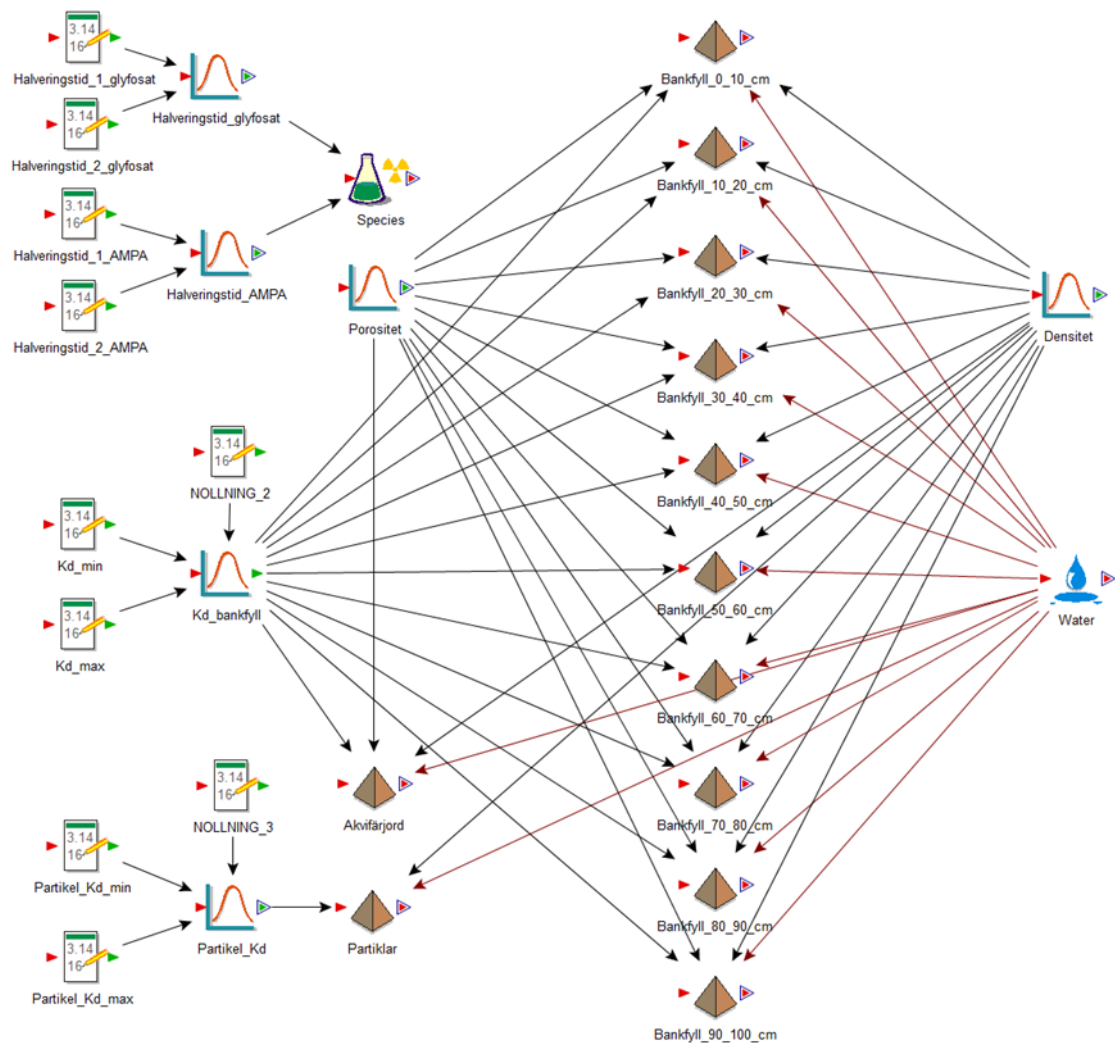
Grunden till glyfosatmodellen har varit imazapyrmodellens uppbyggnad. En parameterisering har gjorts likväl som omplacering av vissa funktioner, se tabell 3-3 och figur 4-15.



Figur 4-15. Transportmodell för glyfosat i GoldSim.

Den största skillnaden med glyfosatmodellen och den ursprungliga imazapyrmodellen är att det inte finns tillgänglig mätdata från bankmaterialet utan endast mätdata från grundvattnet för simulering med glyfosat.

Även i boxen *material* har vissa justeringar gjorts. Då inga mätvärden på K_d -värden finns (parametern K_d troligast i imazapyrmodellen), har K_d -värden för bankmaterialet valts att representeras av en stokastisk fördelning med inparametrarna minsta möjliga K_d -värde samt högsta möjliga K_d -värde, se figur 4-16. Även halveringstiden för glyfosat och AMPA representeras av stokastiska fördelningar där ett värde slumpas fram för varje körning. Halveringstid och K_d -värden för glyfosat och AMPA har hämtats från litteratur samt från rekommendationer, se sammanställning av parametervärden i tabell 3-3.



Figur 4-16. Material till glyfosatmodellen i GoldSim, innehållande *halveringstid*, *Kd*-värden för banfyllnad, akvifärfjord samt partiklar, *effektiv porositet*, *densitet* samt *diffusivitet*. Parametern *NOLLNING* ska underlätta vid eventuell simulering med antagandet noll adsorption.

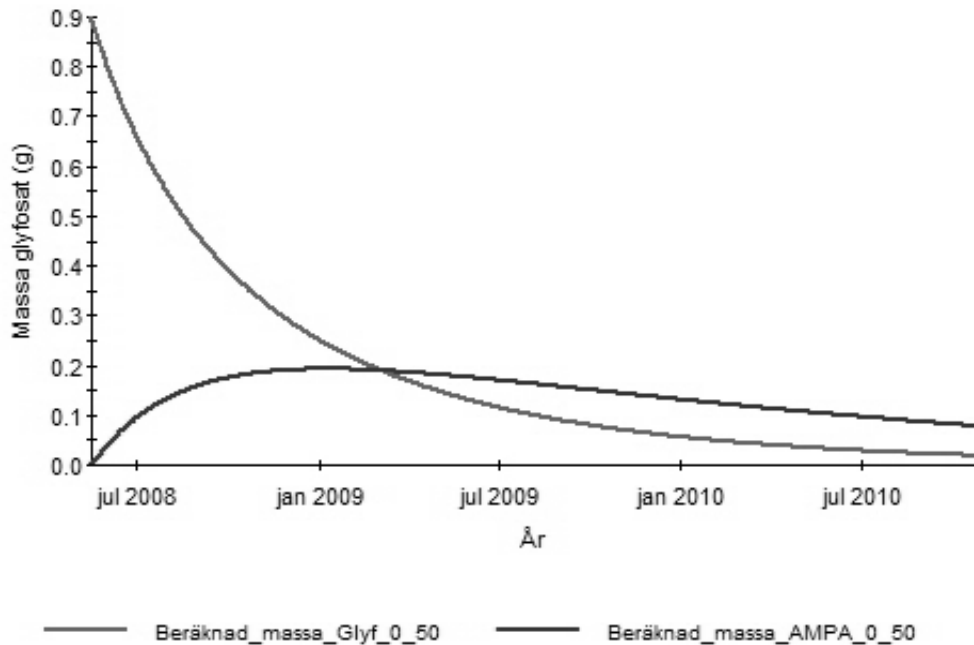
4.5 SIMULERING MED GLYFOSAT

Simuleringar har gjorts på den utvecklade spridningsmodellen med den aktiva substansen glyfosat som finns i bekämpningsmedlet Roundup Bio. Applicering av glyfosat skedde vid $t = 0$ i modellen, då med en dos på 1,8 kg/ha. I verkligheten appliceras glyfosat en gång per år, något som alltså inte tagits hänsyn till i modellen. Detta diskuteras i avsnitt 5. *Diskussion*.

Ingen känslighetsanalys har gjorts för denna modellparametrisering men en optimering av modellen har skett främst genom att ändra parametern *grundvattenvolym* och *avstånd till grundvattenytan*.

Simuleringen med glyfosat simulerades under perioden 2008-05-17 till 2010-10-28 med sammanlagt 894 antal tidssteg och med 1 000 Monte-Carlorealiseringar. Det är under denna tidsperiod som det finns uppmätta värden av glyfosat och AMPA i grundvattnet från de olika mätplatserna Skörpinge, Hasselfors och Lunda.

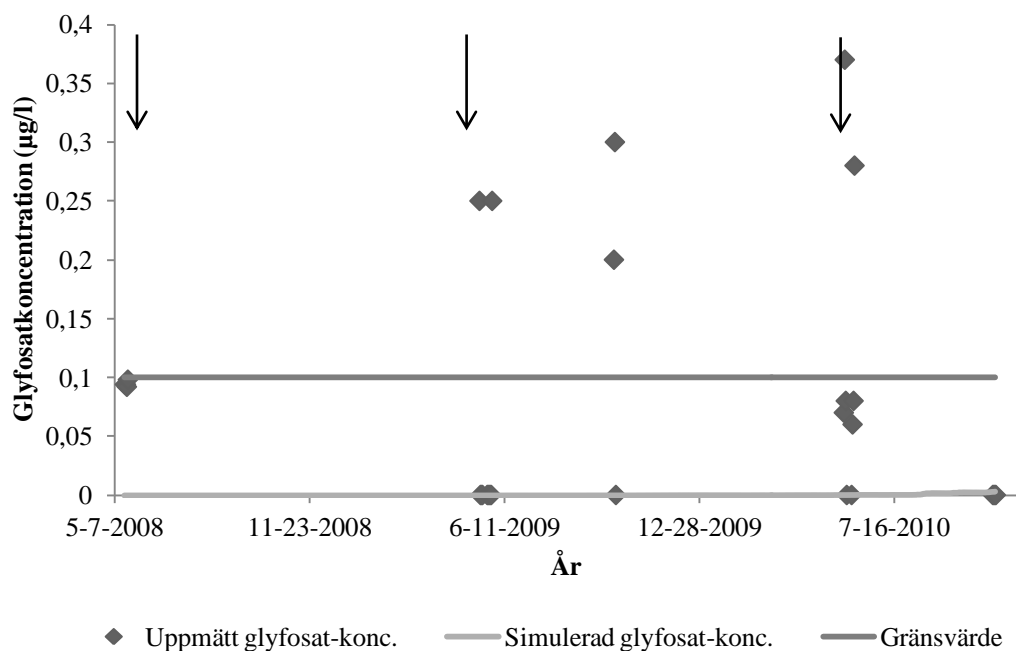
I figur 4-17 redovisas simuleringsresultat för mängd glyfosat samt mängd AMPA summerad över skikten 0 – 50 cm i banvallen. För denna simulering finns inga mätvärden att jämföra med.



Figur 4-17. Mängd glyfosat (g) samt mängd AMPA (g) summerad över skikten 0 - 50 cm. Glyfosat representeras av den blå linjen och AMPA av den röda linjen.

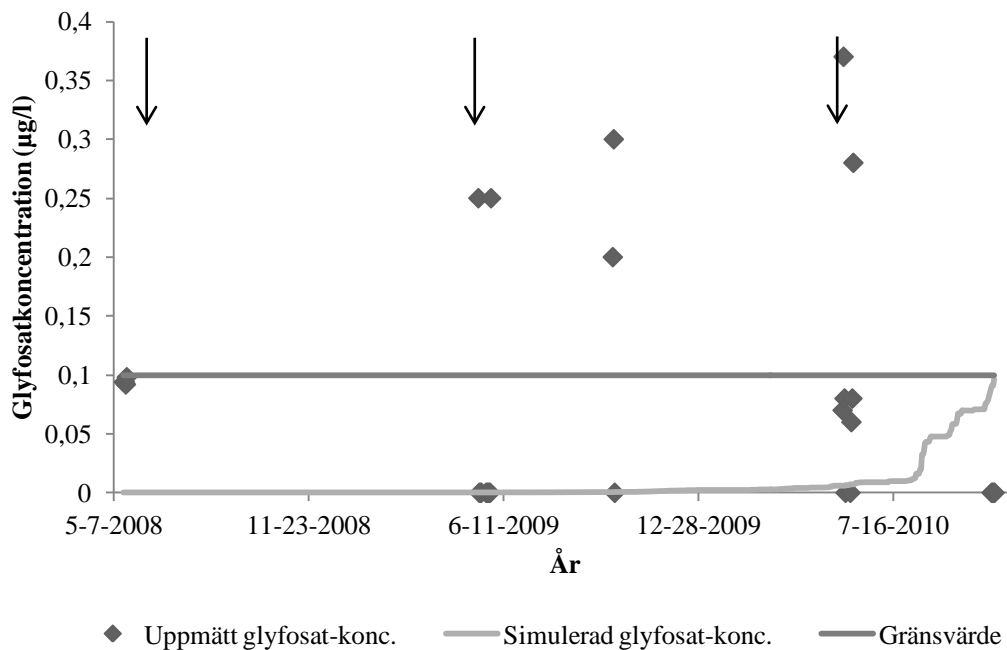
Figur 4-17 visar att glyfosatkoncentrationen avtar genom hela simuleringsperioden samtidigt som glyfosats nedbrytningsprodukt AMPA till en början ökar för att sedan avta den med. Anledningen till att även AMPA minskar efter ett tag är att den i sig också bryts ned och transporteras bort från banvallen. AMPA:s nedbrytningsprodukter har inte simulerats.

Enligt simuleringar påvisas inga glyfosatkoncentrationer i grundvattnet (figur 4-18), medan uppmätta halter av glyfosat har påvisats vid 17 tillfällen mellan år 2008 och 2010.



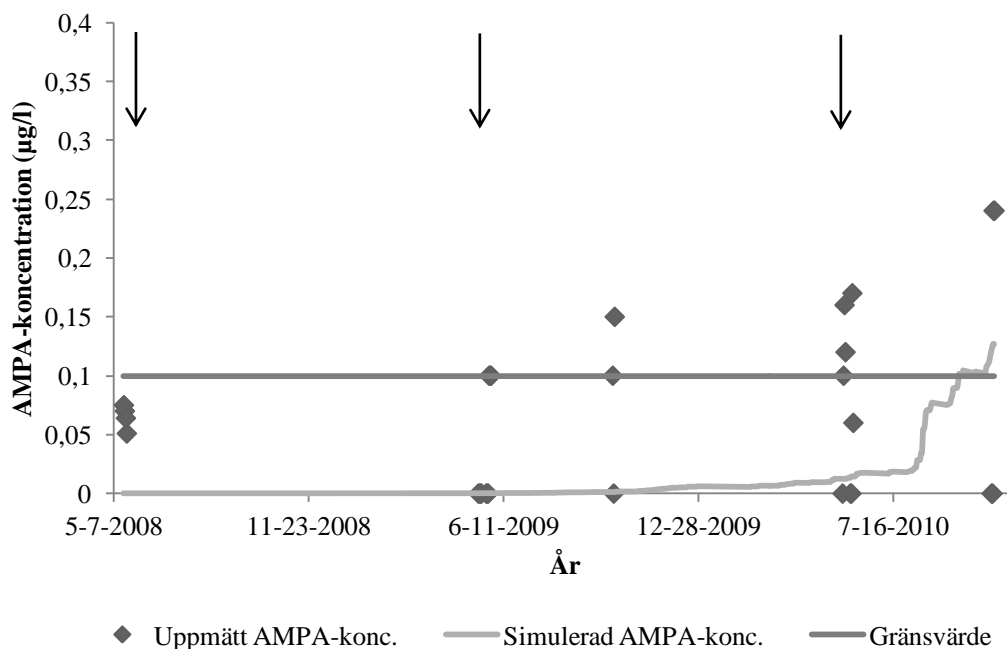
Figur 4-18. Glyfosatkoncentration ($\mu\text{g/l}$) i grundvattnet enligt mätning (punkter) och enligt simulering (ljusgrå linje). Besprutningstillfällena är 2008-05-23, 2009-05-13 samt 2010-05-22 (pilar). Den mörkgrå linjen visar gränsvärdet ($0,1\mu\text{g/l}$) för tillåten halt i grundvattnet (enligt dricksvattenkungörelsen).

Besprutningstillfällena är 2008-05-23, 2009-05-13 samt 2010-05-22, men då för platsen Skörpinge då de flesta mätvärden kommer därifrån. För att få simulerade halter glyfosat i grundvattnet har ett försök till justering gjorts med parametern *avstånd till grundvattenytan* samt parametern *grundvattenvolym*, då till avståndet 0,5 m samt volymen 1 l. Detta diskuteras mer i kapitel 5. *Diskussion*. För att kunna påvisa glyfosatkoncentrationer i grundvattnet har parametervärdena *grundvattenvolym* samt *halveringstid* justerats ytterligare nämligen till 0,1 l respektive 10 år (3 650 dagar), se figur 4-19.



Figur 4-19. Glyfosatkoncentration ($\mu\text{g/l}$) i grundvattnet enligt mätning (punkter) och enligt simulering (ljusgrå linje). Besprutningstillfällen är 2008-05-23, 2009-05-13 samt 2010-05-22 (pilar). Halveringstiden för glyfosat har justerats till 10 år (3650 dagar) och grundvolymen till 0,1 l. Den mörkgrå linjen visar gränsvärdet (0,1 $\mu\text{g/l}$) för tillåten halt i grundvattnet (enligt dricksvattenkungörelsen).

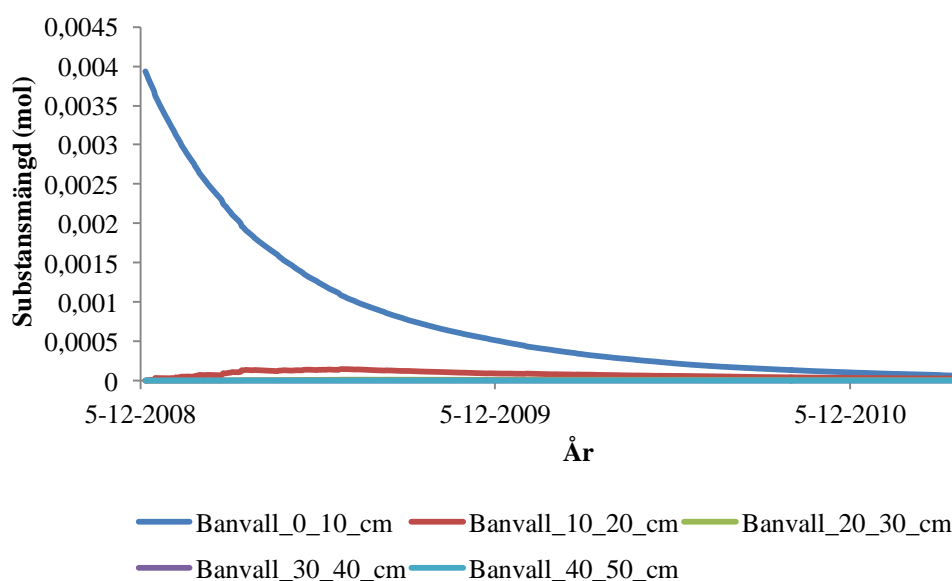
För glyfosats nedbrytningsprodukt AMPA har simulerade värden kunnat framställas, se figur 4-20.



Figur 4-20. AMPA-koncentration ($\mu\text{g/l}$) i grundvattnet enligt mätning (punkter) och enligt simulering (ljusgrå linje). Besprutningstillfällen är 2008-05-23, 2009-05-13 samt 2010-05-22 (pilar). Den mörkgrå linjen visar gränsvärdet (0,1 $\mu\text{g/l}$) för tillåten halt i grundvattnet (enligt dricksvattenkungörelsen).

Parametern *avstånd till grundvattenytan* samt parametern *grundvattenvolym* har justerats för att få ett utslag som liknar uppmätta halter, då till avståndet 0,5 m samt volymen 1 l. Uppmätta avstånd till grundvattenytan på platsen Skörpinge, där de flesta av halterna glyfosat och AMPA funnits i grundvattnet, har uppskattats till i snitt 1,5 m. För grundvattenvolymen finns inga fälldata. Detta diskuteras mer i kapitel 5. *Diskussion.*

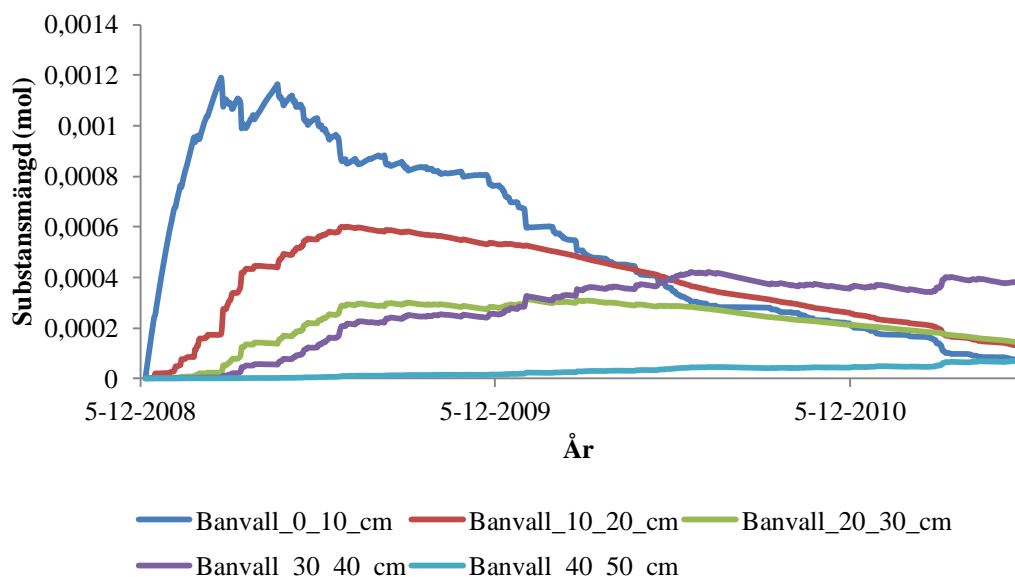
Genombrottskurvor för glyfosat respektive AMPA för fem olika skikt de första 50 cm i banvallen kan ses i figur 4-21 respektive figur 4-22. För resultat för varje skikt för sig, se bilaga E. I bilaga E kan även angiven osäkerhet i simuleringsresultatet från Monte-Carlorealiseringarna betraktas för varje skikt.



Figur 4-21 Simulerade genombrottskurvor för glyfosat för fem olika skikt de första 50 cm i banvallen mellan åren 2008 och 2010. Det mesta av glyfosat bryts ned redan i de översta 10 cm i banvallen.

Genombrottskurvan i figur 4-21 visar att den största nedbrytningen av glyfosat sker i de översta 10 cm i banvallen. Nedbrytningsprodukten AMPA transporteras sedan vidare ner i profilen.

Även AMPA bryts till största del ned i de översta 10 cm i banvallen, se figur 4-22, men även ner till 40 cm i banvallen.



Figur 4-22. Simulerade genombrottskurvor för AMPA för fem olika skikt de första 50 cm i banvallen mellan åren 2008 till 2010. Ungefär hälften av AMPA bryts ned i de översta 10 cm i banvallen, men även en stor del av nedbrytningen sker ner till 40 cm.

4.5.1 Simuleringar av glyfosat vid olika scenarier

Glyfosatmodellen har simulerats vid olika scenarier som representerar ”worst-case” scenarier. De angivna scenarierna är tänkt att representera olika extrema typmiljöer med avseende på avstånd till grundvattenyta, Kd-värde samt halveringstid. I tabell 4-2 presenteras simulerade koncentrationer i grundvattnet (slutvärden) för de olika scenarierna.

Tabell 4-2. Simulerade koncentrationer (slutvärdet) för glyfosat och AMPA i grundvattnet för de olika scenarierna A-H. Den streckade linjen under värdena i tabellen visar de lägsta uppmätta koncentrationerna för glyfosat och AMPA (scenario D). Den heldragna linjen under värdena visar de högst simulerade koncentrationerna (scenario E).

Scenario	Avstånd gr.vattenytan (m)	Kd-värde (l/kg)		t1/2 (dygn)		Simulerad konc. i grundvattnet (µg/l)	
		Glyfosat	AMPA	Glyfosat	AMPA	Glyfosat	AMPA
A	0,5	15 - 60	1,5 - 5,9	24	124,1	$1,58 \cdot 10^{-10}$	2,98
B	0,5	60 - 104	6 - 10,4	24	124,1	$1,59 \cdot 10^{-15}$	$2,11 \cdot 10^{-4}$
C	1	15 - 60	1,5 - 5,9	24	124,1	$2,87 \cdot 10^{-13}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$
D	1	60 - 104	5,9 - 10,4	24	124,1	$1,82 \cdot 10^{-18}$	$3,33 \cdot 10^{-7}$
E	0,5	15 - 60	1,5 - 5,9	242	489,1	<u>1,73</u>	<u>38,7</u>
F	1	15 - 60	1,5 - 5,9	242	489,1	$3,17 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$
G	0,5	60 - 104	5,9 - 10,4	242	489,1	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$
H	1	60 - 104	5,9 - 10,4	242	489,1	$2,02 \cdot 10^{-8}$	$3,15 \cdot 10^{-6}$

Simulerade koncentrationer visar att scenario D ger den lägsta koncentrationen i grundvattnet. Scenario D representerar en banvall med högt Kd-värde, stort avstånd till grundvattenytan samt en snabb halveringstid. De högsta koncentrationerna uppnås i

scenario E där banvallen representeras av ett lågt K_d -värde, ett litet avstånd till grundvattenytan samt en långsam halveringstid.

5. DISKUSSION

5.1 SIMULERING MED IMAZAPYR

Imazapyrmodellen gav en bra uppskattning vid simuleringar på de översta 50 cm i banvallen (figur 4-3) vilket framgår både genom studier av figurer av simulerade massor imazapyr mot uppmätta massor imazapyr och genom studier av effektivvärdet per år. Vid kalibrering med uppmätta imazapyrkoncentrationer i grundvattnet stämmer simulerade värden endast i slutet av simuleringsperioden (figur 4-4). Denna anpassning uppstår dock troligtvis på en felaktig systemmodellering eller av en slump. Modellen missar helt den tydliga genombrottskurvan från uppmätta imazapyrhalter vilket tyder på att modellen inte transporterar ämnet till grundvattnet som det är tänkt. Även om transporten till grundvattnet hade kunnat modelleras är modellen i dagsläget inte gjord så att en omsättning sker i grundvattnet. Därför transporteras inte imazapyrhalterna vidare utan samlas i den sista ”boxen” i modellen (*Grundvatten*). Innan modellen kan börja användas av Trafikverket måste detta ses över. En grundvattenmodell som tar hänsyn till grundvattenomsättning och blir som en påbyggd modul på simuleringssmodellen kan hjälpa till att utreda och utveckla vad som händer i grundvattnet.

I figur 4-3 ses även en relativt stor avklingning av massa imazapyr i banvallen. Detta beror på halveringstiden då denna är inställd så att den de första 153 dagarna är 58 dygn medan den efter 153 dagar (cirka 6 månader) är satt till 1 369 dygn. Detta kan ses som en indikation på att halveringstiden är en viktig och känslig parameter i modellen och därför måste undersökas för varje ny provplats.

Den stora massdifferensen i slutet av simuleringen på de översta 50 cm i banvallen kan bero på att ingen nedbrytningsprodukt efter imazapyr tas hänsyn till i modellen varför denna ”försvinner” som massförlust (se figur 4-8). Enligt Kemikalieinspektionen (2012a) har inga stabila metaboliter hittats, varför nedbrytningsprodukter inte tagits hänsyn till i denna simuleringssmodell. En utvidgning av modellen skulle kunna ta detta i beaktning för att minimera massförlusten, men metaboliterna måste då vara kända.

En viktig parameter i simuleringssmodellen är grundvattenvolymen, vilket krävs för att veta hur stor volym som blivit förorenad. I nuläget fungerar denna parameter inte som den ska i modellen då den måste sättas till orimligt små värden för att kunna uppvisa rimliga halter imazapyr i grundvattnet. För simulerade halter i banvallen spelar denna parameter ingen roll. Den orimligt lilla volymen på grundvattnet på 3,1 l är något oförklarligt men skulle kunna undersökas närmre genom att utveckla en grundvattenmodul. Även i uppbyggnadsskedet av denna spridningsmodell för imazapyr var denna parameter mycket osäker (Vectura, 2011b). Då testades möjligheten att adsorptionen överskattats och den sattes därmed till noll i modellen. Detta gjorde att grundvattenvolymen kunde sättas till 100 m³ (100 000 l) vilket är ett mer rimligt värde. Dock gjorde denna ändring att anpassningen av massa imazapyr i banvallen blev mycket sämre, då inget imazapyr uppehölls i banvallen utan rann igenom utan att hinna brytas ned. I en nyare banvall är dock detta en möjlighet då det grova makadammet gör att nederbörden med bekämpningsmedel lätt kan sippra igenom banvallen och nå

grundvattnet. Modellen är tänkt att vara uppbyggd på så sätt att den representerar en äldre banvall som innehåller mer finkornigt material där imazapyr kan adsorbera, stanna kvar och brytas ned för att tillslut nå grundvattnet, men i betydligt lägre halter.

5.2 ANALYSER AV IMAZAPYRMODELL

För att få en bra kalibrering mellan uppmätta och simulerade värden med imazapyr krävs bra indata till modellen. I känslighetsanalysen påvisades att viktiga parametrar att ta hänsyn till för att bestämma massan imazapyr i banvallen är *Kd-värdet* och *halveringstiden*. En liten ändring av dessa värden genererade en stor ändring i simulerad massa imazapyr i banvallen. För simulerade koncentrationer imazapyr i grundvattnet visade känslighetsanalysen att parametern *avstånd till grundvattenytan* är av största vikt att bestämma korrekt. En liten ändring av detta värde genererade en stor ändring av halten imazapyr i grundvattnet. Även parametrarna *Kd-värde*, *nederbörd*, *halveringstid* och *grundvattenvolym* visade sig vara känsliga. En uppseendeväckande iakttagelse är att parametern *partikelproduktion* inte alls verkar ha någon stor betydelse för varken massan imazapyr i banvallen eller halten imazapyr i grundvattnet. Denna parameter har i tidigare studier antagits vara mycket viktig med avseende på imazapyrs transport i banvallen till grundvattnet (Almqvist, 2004; Jarvis m.fl., 2006). Teorin om detta bygger på att *Kd*-värden för finare partiklar normalt är högre än för grövre vilket skulle betyda att en ökad partikelproduktion, alltså finare partiklar, skulle öka risken att förorening adsorberar och på så sätt tar sig ned genom banvallen. Resultatet av känslighetsanalysen skall dock inte ses som ett bevis utan bara ge en tankeställare om att det är en svår parameter att fastställa.

Om avståndet till grundvattenytan, *Kd*-värden och halveringstider för aktuell plats kan bestämmas i fält ges möjligheten för bättre överensstämmande simuleringsresultat och en mer noggrann och riktig modell. Vet man dessa mer noggrant kan det tänkas att grundvattenvolymen, som nu är en mycket osäker parameter i modellen, skulle kunna uppskattas bättre.

Beräkningen av effektivitetvärdet för modellen vad gäller simulering av massa imazapyr i banvallen visade på dåliga värden under hela simuleringsperioden. Vid beräkning år för år visar modellen ett bättre effektivvärde, speciellt i början och i slutet av simuleringsperioden. 1995 var det år som var sämst vilket kan bero på att det är då bytet av halveringstid sker i modellen.

Den statistiska bearbetningen av modellen (figur 4-14) visar att osäkerheten i simuleringsresultaten per skikt i banvallen (bilaga D, figur D-2, D-4, D-6, D-8, D-10) ökar med ökat djup. Detta indikerar att inparametrarnas osäkerheter ger större effekt ju längre ner i banvallen man tittar.

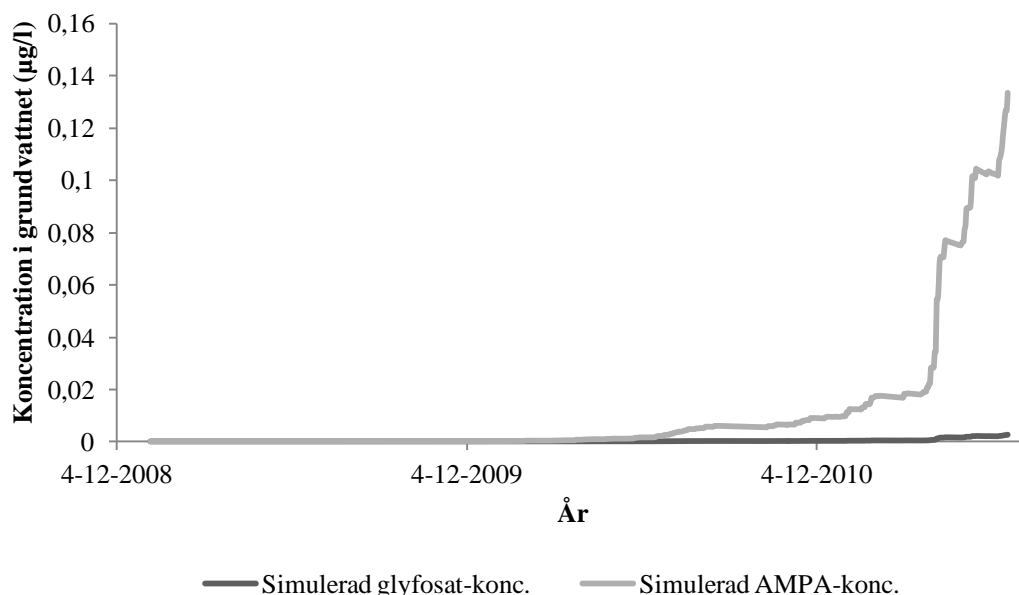
5.3 SIMULERING MED GLYFOSAT

Simuleringar med glyfosat och dess nedbrytningsprodukt AMPA har utförts för både massa förorening i banvallen samt föroreningshalt i grundvattnet. I banvallen finns inga uppmätta värden av glyfosat och AMPA som simulerade resultat kan jämföras med. Figur 4-17 visar att glyfosat bryts ned till AMPA som i sin tur också minskar efter en

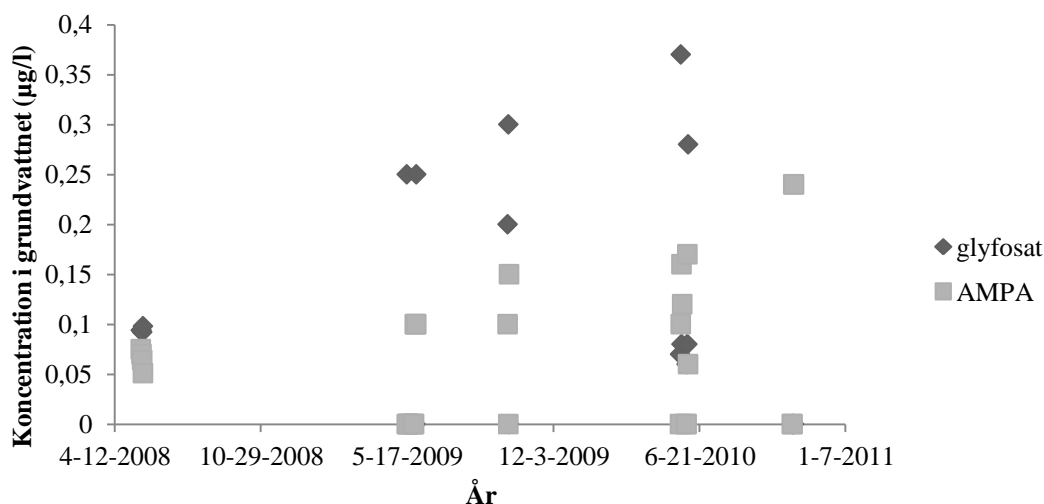
tid. Denna konstanta avklingning under simuleringsperioden är något felaktig då appliceringen av herbicider egentligen sker en gång per år och modellen borde då kunna visa toppar i figuren. Dock har modellen endast ett appliceringstillfälle, nämligen då $t = 0$. Att det endast sker ett appliceringstillfälle i modellen bör justeras så att det mer liknar verkligheten.

Simuleringsresultat från grundvattnet har jämförts med uppmätta värden glyfosat och AMPA från platserna Skörpinge, Hasselfors och Lunda. Dessa uppmätta värden är mycket få (endast 17 prov med uppvisade halter av 289 tagna prov) varför en jämförelse med dessa inte behöver ge en rättvis kalibrering av modellen. Fältstudier och laborationsstudier visar att glyfosat och AMPA sällan hittas i grundvattnet vilket också modellen visar. Att vissa uppmätta värden är höga (över Livsmedelsverkets gränsvärde på $0,1 \mu\text{g/l}$) kan bero på närliggande jordbruk som använder bekämpningsmedlet Roundup Bio som innehåller den aktiva substansen glyfosat med dess nedbrytningsprodukt AMPA. Detta leder till att indata i form av uppmätta halter på glyfosat och AMPA är mycket osäkra då de är väldigt få samt att de kommer från helt olika ställen med helt olika förutsättningar. Dock är 12 av de 17 proverna från platsen Skörpinge, varför nederbördsdata och temperaturdata från SMHI har valts att hämtas från en mätstation i Malmö.

Skillnad mellan uppmätta och simulerade värden med glyfosat samt AMPA (figur 5-1 och figur 5-2) kan bero på platsspecifika utgångspunkter så som dåliga förutsättningar för nedbrytning i form av låga halter organiskt material, låg temperatur, inget ljus etc.



Figur 5-1. Simulerade glyfosatkoncentrationer (mörkgrå linje) och simulerade AMPA-koncentrationer (ljusgrå linje). Simulerade halter glyfosat är mindre än simulerade halter AMPA.



Figur 5-2. Uppmätta glyfosatkoncentrationer (mörkgrå punkter) och uppmätta AMPA-koncentrationer (ljusgrå punkter) i grundvattnet från provpunkterna Skörpinge, Hasselfors och Lunda. Generellt är uppmätta glyfosatkoncentrationer i grundvattnet högre än uppmätta AMPA-koncentrationer. Denna figur innehåller åtta prover som har halter under rapporteringsgränsen på 0,1 µg/l.

Dessutom är uppmätta halter av glyfosat betydligt högre än simulerade värden, högst uppmätt på 0,37 µg/l mot högsta simulerade värde på 0,002 µg/l. Skillnaden mellan uppmätta värden på AMPA mot simulerade värden är inte lika stor där högst uppmätta värdet är på 0,24 µg/l mot simulerat värde på 0,14 µg/l. Spridningsmodellens förmåga att simulera halter i grundvattnet bör diskuteras och undersökas närmre. Nu verkar det som om att modellen inte gör det den är ämnad att göra.

Observerade halter AMPA i figur 4-20 tyder på ett mycket heterogent system då höga och låga värden kan observeras direkt efter appliceringen av herbiciden. Enligt tidigare studier påvisas den mesta av AMPA:n 30 cm ner i banvallen (Torstensson m.fl., 2005). Vid granskning av AMPA:s simulerade genombrottskurvor (figur 4-22) tyder värdena på att det mesta av AMPA:t återfinns i de översta 10 cm. Det är också där som det mesta av glyfosat bryts ned (figur 4-21). Skillnaden mot tidigare studier kan bero på felaktiga indata i modellen.

Simulering av glyfosatmodellen vid de olika scenarierna A-H (tabell 4-2) visar som väntat att ett lågt K_d -värde, en lång halveringstid samt ett kort avstånd till grundvattenytan kommer att generera en större koncentration av föroreningen i grundvattnet.

Precis som i imazapyrmodellen måste grundvattenvolymen sättas till orimligt låga värden för att överhuvudtaget få glyfosat- och AMPA-koncentrationer i grundvattnet. Att detta även visas i glyfosatmodellen tyder på att parametern inte fungerar som den är tänkt.

I detta skede kan det konstateras att modellen är användbar men kan göras bättre genom fler parameterdata som K_d -värden, halveringstid och avstånd till grundvattenytan samt fler uppmätta herbicidkoncentrationer för en bättre kalibrering. Det bör också påpekas

att spridningen i grundvattnet inte redovisas i den aktuella modellen, något som en grundvattenmodul skulle kunna visa.

5.4 FÖRSLAG TILL FORTSATTA STUDIER

För att kunna kalibrera modellen ytterligare behöver den kompletteras med ytterligare provtagningsplatser och provtagningar i miljökontrollprogrammet. Resultatet av känslighetsanalysen ger möjlighet att planera fortsatt provtagning. Ett faktum är att spridningsmodellen i GoldSim bara blir bättre och bättre ju mer indata som finns att tillgå (Forsman, pers. medd., 2012). Det finns tankar om att utvidga detta till en forskarstudie för att ytterligare kunna utreda olika bekämpningsmedels påverkan och spridning på järnvägsbanvallar i Sverige.

En grundvattenmodul kan hjälpa till att förstå spridningen i grundvattnet och på så sätt ge en ökad förståelse i vilken omfattningen olika skyddsvärda miljöer exponeras. Detta skulle kanske även kunna bringa klarhet i hur parametern *grundvattenvolym* fungerar i modellen. Ett sätt att bättre förstå transporten av herbicid i modellen är att släppa igenom ett konservativt ämne, alltså ett ämne som inte bryts ned, t ex klorid. På så sätt kan nedbrytningen testas och koncentrationen i grundvattnet kan undersökas lättare.

I denna utvecklade modell sker appliceringen av preparatet en gång under simulerings-tiden nämligen då $t = 0$. Så är det inte i verkligheten utan banvallen besprutas vanligtvis en gång per år. Denna möjlighet behöver läggas in i modellen för att lättare kunna kalibrera simulerade värden mot uppmätta värden.

Fortsatt arbete med modellen, för att göra den mer lätthanterlig, är att använda GoldSims verktyg som kallas *dash-board* där användaren lätt kan ändra de parametrar som har stor betydelse och är platsberoende. Detta hjälpverktyg gör att användaren inte behöver vara insatt i själva modellens uppbyggnad. En annan möjlighet till vidareutveckling är att koppla in GIS till modellen och själva *dash-boarden* så att platsspecifika data kan tillföras modellen så som klimat och jordart.

6. SLUTSATSER

- Det beräknade effektivvärdet per år visar att modellen är effektiv vid simuleringar av imazapyrmasa i banvallen. För simuleringar i grundvattnet är modellen inte lika effektiv. Simuleringen av imazapyr visar på en bra kalibrering mot uppmätta värden från provplatsen Ina. Dock ökar osäkerheten i modellen ju längre ner i banvallens skikt man tittar.
- Känslighetsanalysen visade att de känsligaste parametrarna i modellen är *avstånd till grundvattenyta*, *adsorptionsförmåga (Kd-värde)* i banvallen, *halveringstid* samt *nederbörd*.
- Simuleringar med bekämpningsmedlet Roundup Bio med den aktiva substansen glyfosat visar på mycket små koncentrationer av både glyfosat och AMPA i grundvattnet.
- Scenarioanalysen visade som väntat att ett lågt *Kd-värde*, en lång *halveringstid* samt ett kort *avstånd till grundvattenytan* kommer att generera en större koncentration av herbiciden i grundvattnet.
- Modellen behöver utredas vidare med avseende på bekämpningsmedlet Roundup Bio med den aktiva substansen glyfosat och dess nedbrytningsprodukt AMPA då det är detta bekämpningsmedel som Trafikverket använder i dagsläget.
- Modellens trovärdighet kan diskuteras vad gäller simulerade koncentrationer av förorening i grundvattnet. I nuläget är det svårt att uppskatta denna koncentration då den totala volymen som blivit förorenad är okänd. För att överhuvudtaget få koncentrationer i grundvattnet måste parametern *grundvattenvolym* i modellen sättas till orimligt små värden (cirka 3 l). Ett mer rimligt värde skulle vara 100 m³ (100 000 l).
- Fortsatta studier bör ske, främst genom att fortsätta med miljökontrollprogrammet och ta fler prover i fält. Mer indata kommer att ge en mer korrekt simuleringsmodell. Modellen skulle också kunna utvecklas så att den blir lättare att använda med ett hjälpverktyg som heter *dash-board* som finns inbyggt i GoldSim.

7. REFERENSER

- Almqvist, S. (2004). *Simulering av bekämpningsmedelstransport i banvall: utveckling av ett prognosverktyg*. Examensarbete, Institutionen för Markvetenskap, SLU, Uppsala 2004, ISSN 1651-7210.
- Andersson, L. (2002). *Metallers lakningsbenägenhet hos järnsand i banvall*. Examensarbete, Institutionen för Samhällsbyggnadsteknik, Luleå Tekniska högskola 2002, ISSN 1402 - 1617.
- Bergström, L., Börjesson, E., Stenström, J. (2011). Laboratory and Lysimeter Studies of Glyphosate and Aminomethylphosphonic Acid in a Sand and Clay Soil. *J. Environ. Qual.*: Madison, USA.
- Beven, K. (2009). *Environmental modelling: an uncertain future?* London: Routledge.
- Brady, N.C., Weil, R.R. (1999). *The Nature and Properties of Soils*. 12th edition. Prentice-Hall: New Jersey.
- Börjesson, E., Torstensson, L., Stenström, J. (2004). The fate of imazapyr in a Swedish railway embankment. *Pesticide Management Science*. 60, 544-549.
- Cederlund, H., Stenström, J. (2004). Microbial biomass and activity on railway track and embankments. *Pesticide Management Science*. 60, 550-555.
- Cederlund, H., Thierfelder, T., Stenström, J. (2008). Functional microbial diversity of the railway track bed. *Science of the Total Environment* 397 (2008) 205-214.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2. Ed. New York: Wiley.
- Golder Associates AB (2008). *Banverket Kontrollprogram Bekämpningsmedel – Beskrivning av modell för herbicidtransport i banvall*. [Opublicerat verk].
- GoldSim (2012a). *What is Simulation?*
<http://goldsim.com/Web/Introduction/Simulation/> Hämtad 2012-02-02
- GoldSim (2012b). *Probabilistic Simulation*.
<http://goldsim.com/Web/Introduction/Probabilistic/> Hämtad 2012-02-02.
- GoldSim (2012c). *When to Use Simulation*.
<http://goldsim.com/Web/Introduction/WhentoSimulate/> Hämtad 2012-02-02.
- GoldSim (2012d). *Contaminant Transport Module*.
<http://goldsim.com/Web/Products/Modules/ContaminantTransport/> Hämtad 2012-02-13.
- Gustavsson, M. (2007). *Järnvägens föroreningar – källor, spridning och åtgärder. En litteraturstudie*. Linköping: Statens väg- och transportforskningsinstitut.

Jansson, S. (2001). *Provtagning av ballastmassor i banvall*. Examensarbete, ISNR SLU-MLE-EXS - -45 - -SE, Institutionen för markvetenskap, Avdelningen för markkemi och jordmånslära, Uppsala Universitet 2001, ISSN 1102-1381.

Jarvis, N.J., Almqvist, S., Stenström, J., Börjesson, E., Jonsson, E., Torstensson, Lennart (2006). Modelling the leaching of imazapyr in a railway embankment. *Pesticide Management Science*. 62:940 – 946 (2006).

Jordbruksverket (2011/2012). *Kemisk ogräsbekämpning*.
http://www2.jordbruksverket.se/webdav/files/SJV/trycksaker/Pdf_ovrigt/be20.pdf
Hämtad 2012-01-19.

Kemikalieinspektionen (2012a). *Imazapyr*. Uppdaterad februari 1998.
<http://apps.kemi.se/bkmregoff/Bkmblad/Imazapyr.pdf> Hämtad 2012-01-17.

Kemikalieinspektionen (2012b). *Glyfosat*. Uppdaterad november 1997.
<http://apps.kemi.se/bkmregoff/bkmblad/Glyfosat.pdf> Hämtad 2012-01-17.

Kemikalieinspektionen (2012c). *Arsenal 250*. Uppdaterad 2001-07-24.
<https://apps.kemi.se/bkmregoff/default.cfm> Hämtad 2012-02-01.

Kemikalieinspektionen (2012d). *Roundup Bio*. Uppdaterad 2006-06-27.
<https://apps.kemi.se/bkmregoff/default.cfm> Hämtad 2012-02-01.

KIFS (2008:3). *Kemikalieinspektionens föreskrifter om bekämpningsmedel*. 2008. Kemikalieinspektionen.

Lankreijer, H.J.M. (1998). *The water balance of forests under elevated atmospheric CO₂*. University of Groningen.

Miljömålsportalen (2012). *Giftfri miljö*. Uppdaterad 2011-10-31.
<http://www.miljomal.se/4-Giftfri-miljo/> Hämtad 2012-01-19.

Montanari, Alberto (2005). *Large sample behaviors of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) in assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations*. Water Resources Research, Vol. 41, W08406, doi: 10.1029/2004WR003826, 2005. Faculty of Engineering, University of Bologna: Italy.

Naturvårdsverket (1997). *Spridning av kemiska bekämpningsmedel – Tillämpning av Naturvårdsverkets föreskrifter om spridning av kemiska bekämpningsmedel, Allmänna råd 97:3*. Tuna Tryck, 1997.

SGI (2002). Sveriges Geologiska Institut. *Potentiella efterbehandlingsmetoder för Banverkets förorenade områden*. Diariennr: 1-0009-0603. Projektnr: 10632. Banverket bansystem 02-10 DNR S01-854/08.

SFS (1998). *Miljöbalken*, Stockholm: Justitiedepartementet. 1998:899.

- Livsmedelsverket (2001). *Livsmedelsverkets föreskrifter om dricksvatten*. SLVFS: 2001:30.
- SNFS (1997). *Statens naturvårdsverks författarsamling om spridning av kemiska bekämpningsmedel*. Statens naturvårdsverk: 1997:2.
- Sterner, O (2003). *Förgifningar och miljöhot*. Studentlitteratur: Lund.
- SWECO VIAK (2005). *Miljökontrollprogram för kemisk ogräsbekämpning – Förstudie*. Stockholm. [Opublicerat verk].
- Tham, M., Pålsson, L. (2006). *Bekämpning på grönytor*. Jönköping: Jordbruksverket.
- Torstensson, L. (1989). *Bekämpningsmedel i den yttre miljön*. Naturvårdsverket, rapport 3536.
- Torstensson, L. (1990). *Kemiska bekämpningsmedel, hur transporteras de i miljön?* Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Torstensson, L. (1997). *Bekämpningsmedel i svenska vatten – en fråga om hantering*. Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Torstensson, L. (2001). Use of herbicides in railway tracks in Sweden. *Pesticide Outlook*, 12(1), 16-21.
- Torstensson, L. (2004). *Herbicide Use On Railways*.
http://www.egeis.org/home/monitoring/case_studies.php?article_id=109 Hämtad 2012-03-14.
- Torstensson, L. (2005). *Samarbete mellan Banverket och Sveriges Lantbruksuniversitet rörande ogräsbekämpning på banvallar 1985 – 2005*. SLU Service/Repro, Uppsala 2007.
- Torstensson, L., Börjesson E., Stenström, J (2005). Efficacy and fate of glyphosate on Swedish railway embankments. *Pesticide Management Science*. 61, 881-886.
- Trafikverket, (2010a). *Trafikverkets miljörapport 2010*. Trafikverket.
- Trafikverket (2010b). *Ogräsbekämpningsmedel*. [Video] Sverige: Gunnar Nilsson MediaBild AB.
http://streaming.vv.se/trafikverket/ogras_wmv9_768kbit_widescreen.wmv Hämtad 2012-01-26.
- Trafikverket (2012a). *En dag med vegetationsbekämparna*. Uppdaterad 2010-06-03.
<http://www.trafikverket.se/Aktuellt/Nyhetsarkiv/Nyhetsarkiv2/Nationellt/201006/En-dag-med-vegetationsbekamparna/> Hämtat 2012-01-19.

Trafikverket (2012b). *Vegetationsbekämpning*. Uppdaterad 2010-03-15.
<http://www.trafikverket.se/Pressrum/faktamaterial/Miljoinformation/Vegetationsbekampning/> Hämtad 2012-01-19.

Trafikverket (2012c). *Vegetationsbekämpning*. Uppdaterad 2011-07-06.
<http://www.trafikverket.se/Foretag/Bygga-och-underhalla/Jarnvag/Arstidsrelaterat-underhall/Vegetationsbekampning/> Hämtad 2012-01-17.

Trafikverket (2012d). *Ogräsbekämpning på järnväg*. Uppdaterad 2010-07-05.
<http://www.trafikverket.se/Pressrum/Bilder-och-artiklar/Bilder/Ograsbekampning-pa-jarnvag/> Hämtad 2012-01-19.

Trafikverket (2012e). *Bekämpningsmetoder*. Uppdaterad 2010-06-04.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Miljo-och-halsa/Halsa/Kemiska-produkter-och-material/Kemisk-bekampning/Bekampningsmetoder/> Hämtad 2012-02-01.

Trafikverket (2012f). *Bekämpningsmedel*. Uppdaterad 2010-05-04.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Miljo-och-halsa/Halsa/Kemiska-produkter-och-material/Kemisk-bekampning/Bekampningsmedel/> Hämtad 2012-02-01.

Trafikverket (2012g). *Sveriges järnvägsnät*. Uppdaterad 2011-06-07.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Vagar-och-jarnvagar/Sveriges-jarnvagsnat/> Hämtad 2012-02-09.

Trafikverket (2012h). *Järnvägshistoria*. Uppdaterad 2011-01-14.
<http://www.trafikverket.se/Museer/Om-Trafikverkets-museer/Samlingar--kunskaap/Trafikhistoria/Jarnvagshistoria/> Hämtad 2012-02-09.

SMHI (2012). *Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut - Dataserier 1961-2011*. <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/dataserier-2.1102>. Hämtad 2012-02-20.

Vectura Consulting AB (2011a). *Miljökontrollprogram för kemiska ogräsbekämpningsmedel*. Objekt nr 103877. [Opublicerat verk].

Vectura Consulting AB (2011b). *Trafikverket Kontrollprogram bekämpningsmedel – Simulering av imazapyrtransport i banvall*. [Opublicerat verk].

Muntliga källor:

Cederlund, Harald. (2012a). Biträdande forskare inom mikrobiologi, SLU.
E-postkontakt, 2012-02-09.

Cederlund, Harald. (2012b). Biträdande forskare inom mikrobiologi, SLU.
E-postkontakt, 2012-05-30.

Forsman, Jonas (2012). Miljö- och vattenspecialist, Vectura Consulting AB.
E-postkontakt, 2012-03-22.

Jonsson, Erik (2012a). Miljöutredare Vectura Consulting AB. *2012-01-18.*

Jonsson, Erik (2012b). Miljöutredare Vectura Consulting AB. *2012-03-08.*

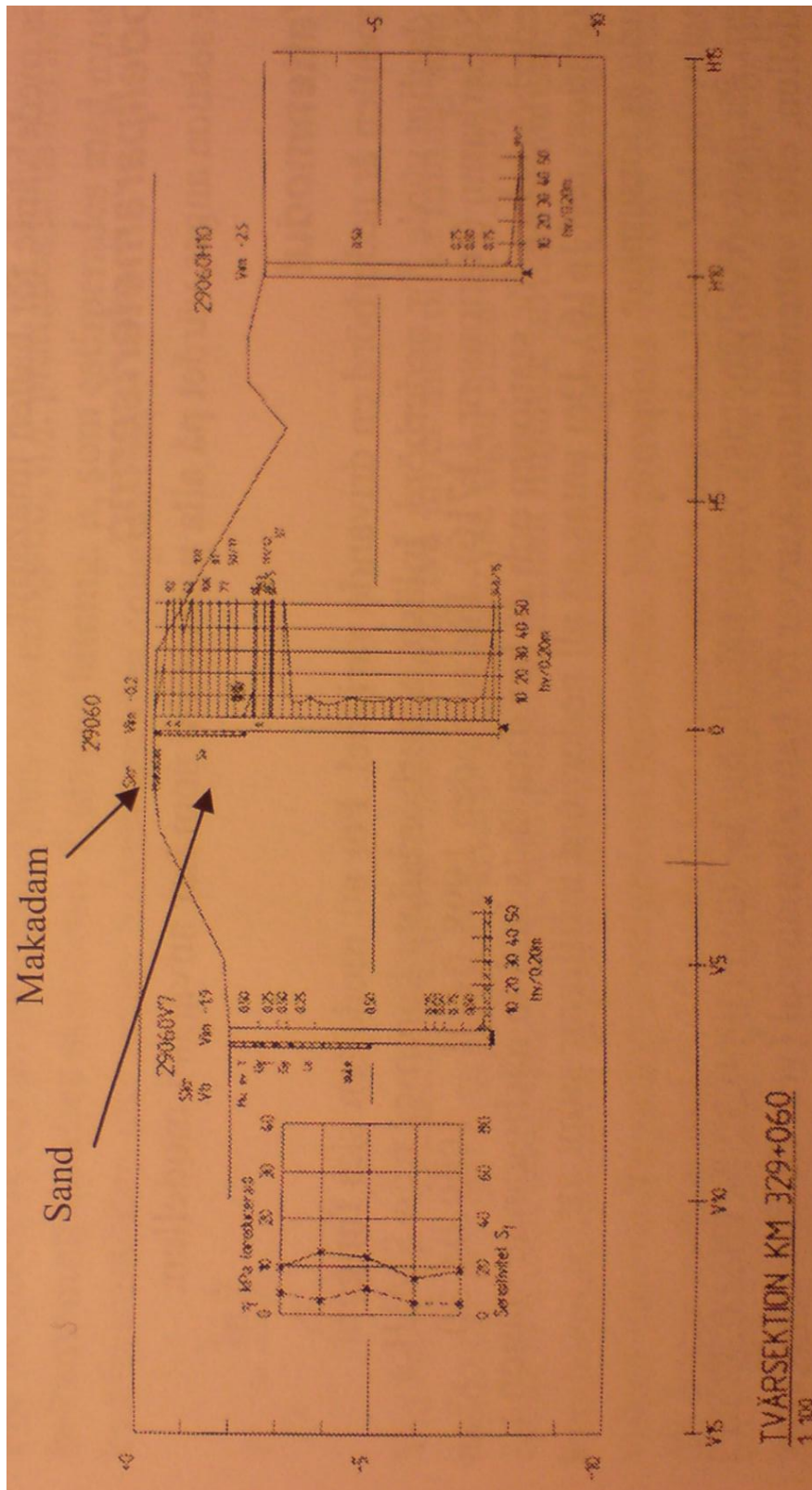
Jonsson, Erik (2012c). Miljöutredare Vectura Consulting AB. *2012-05-15.*

BILAGA A – TYPMILJÖER FÖR DE OLIKA PROVPLATSERNA

Fjärrzon	Närzon					
	1. Nyare järnväg, med bankfyllning (naturligt material)	2. Nyare järnväg, utan bankfyllning	3. Äldre järnväg, med bankfyllning (naturligt material)	4. Äldre järnväg utan bankfyllning men med underballast (frost-isoleringslager av (i) kolaska, (ii) torv och eller (iii) slagg).	5. Bangård	6. Stationsområde
A. Större moränområden med litet djup till grundvattentytan (<1-2 m) och öppna grundvattenförhållanden						
Aa. Grusig-sandig morän			Falkenberg			
Ab. Siltig-lerig morän	Ängelholm		Lunda, Hasselfors		Ånge	
B. Mindre moränområden med slutna grundvattenförhållanden (provtagning i både övre och undre grundvattenmagasin)			Brodbo			
C. Sandig-grusig isälvslagring med större djup (<5 m) till grundvattentytan						
Ca. Öppna grundvattenförhållande			Högberget, Tågsjöberg			
Cb. Slutna grundvattenförhållanden (provtagning i både övre och undre grundvattenmagasin)						

Tabell A-1. Kombinationer närzon – fjärrzon som föreslås ingå i miljökontrollprogrammet, inkl. redovisning av de etablerade provtagningsplatserna (Vectura, 2011a). Aktuella provplatser i denna rapport är Ängelholm, Lunda och Hasselfors vilka är fetmarkerade i tabellen.

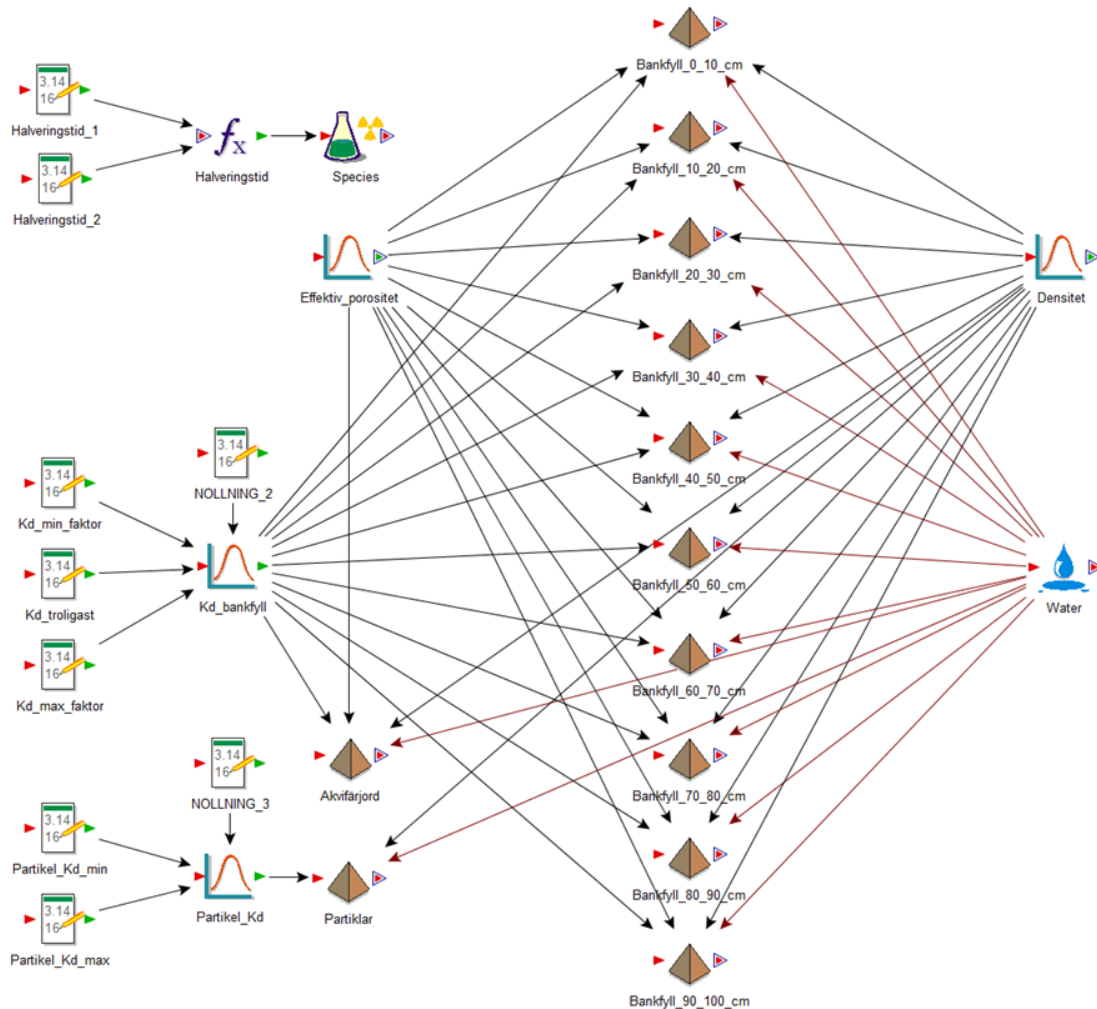
BILAGA B – TVÄRSEKTION ÖVER BANVALL VID INA



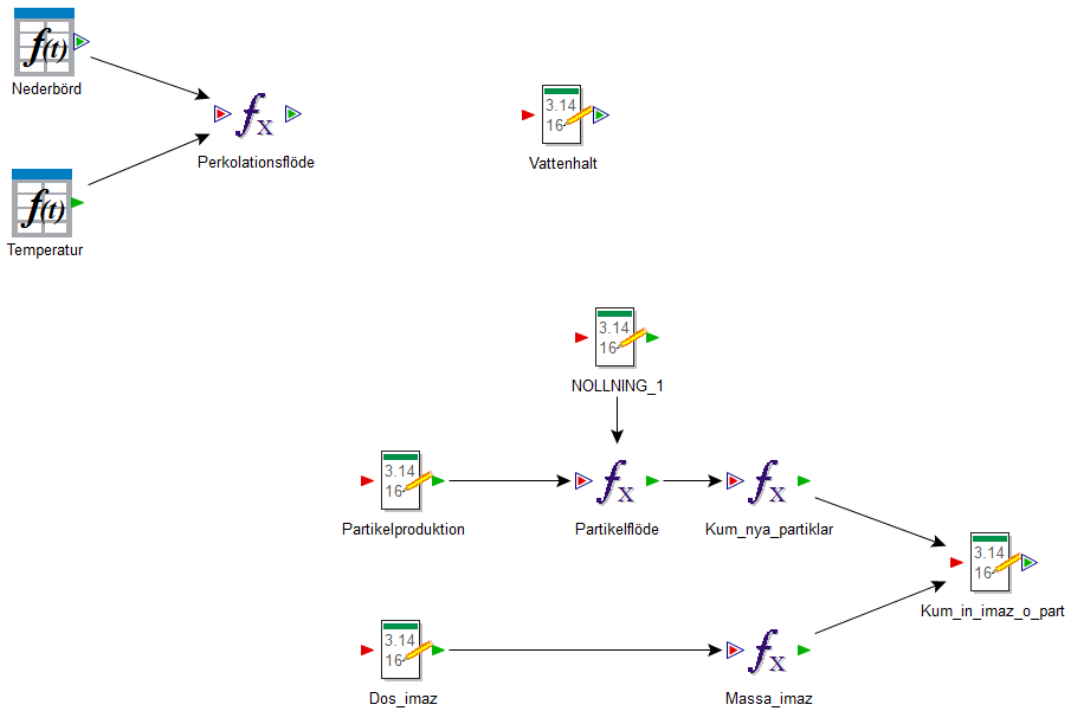
Figur B-1. Tvärsektion över banvall vid provplats 760, Ina. Banvallens översta lager består av ett tunt lager makadam (cirka 40 cm) över ett flera meter mäktigt sandlager (Almqvist, 2004).

BILAGA C – UPPBYGGNAD IMAZAPYRMODELL

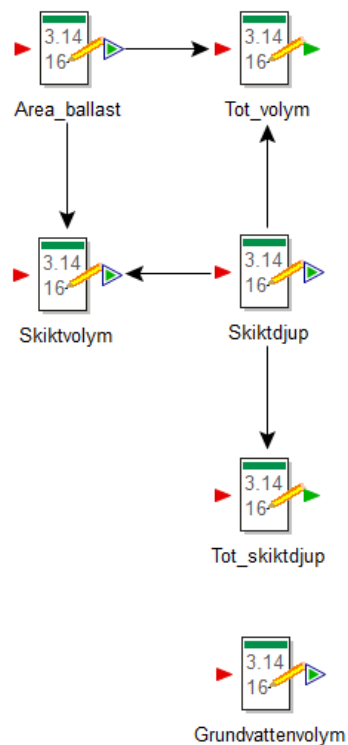
Imazapyrmodellens uppbyggnad i simuleringsprogrammet GoldSim kan studeras mer i detalj i denna bilaga. Här visas modellens *material* (figur C-1), *flöden* (figur C-2), banvallens *geometri* (figur C-3), *massa partiklar* (figur C-4) samt *resultat med osäkerheter* (figur C-5). Figur C-6 visar en översikt över transporten i ett skikt i banvallen.



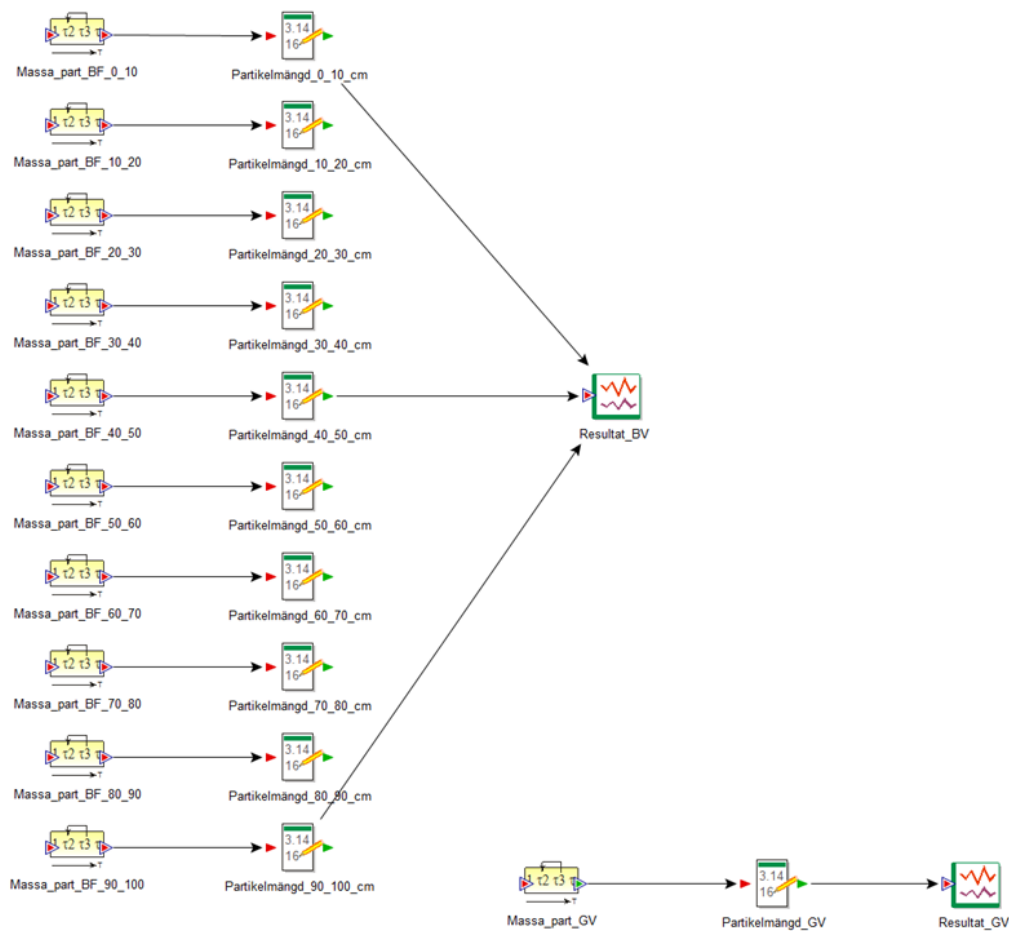
Figur C-1. Material till imazapyrmodellen, innehållande *halveringstid*, *Kd*-värden för banfyllnad, akvifärgjord samt partiklar, *effektiv porositet*, *densitet* samt *diffusivitet*. Parametern *NOLLNING* ska underlätta vid eventuell simulering med antagandet noll adsorption.



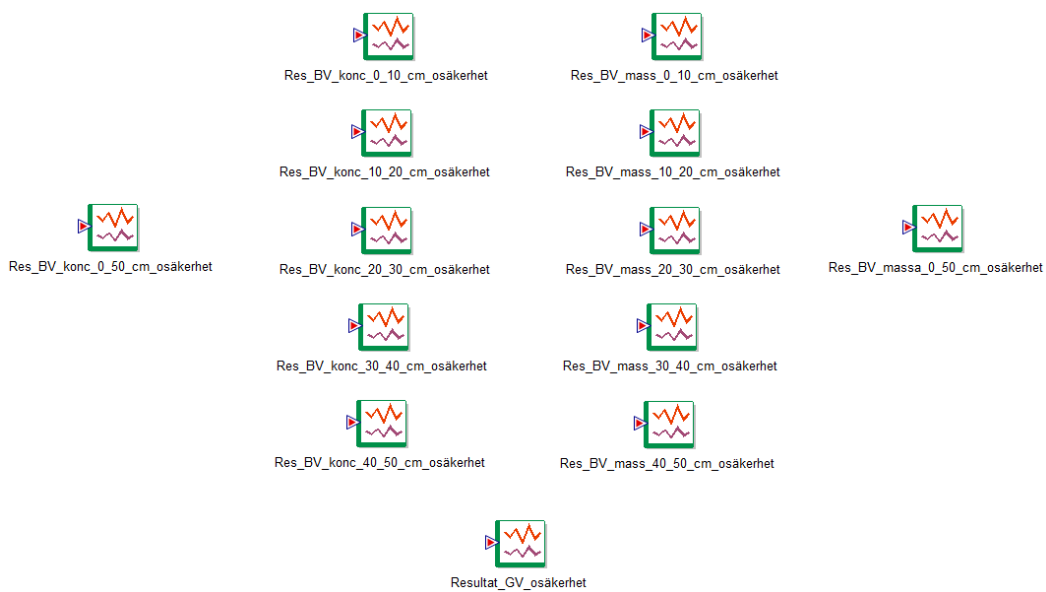
Figur C-2. Flöden i imazapyrmodellen innehållande nederbörd (om temperaturen är större än noll grader), vattenhalt, partikelproduktion samt applicerad dos imazapyr på banvallen.



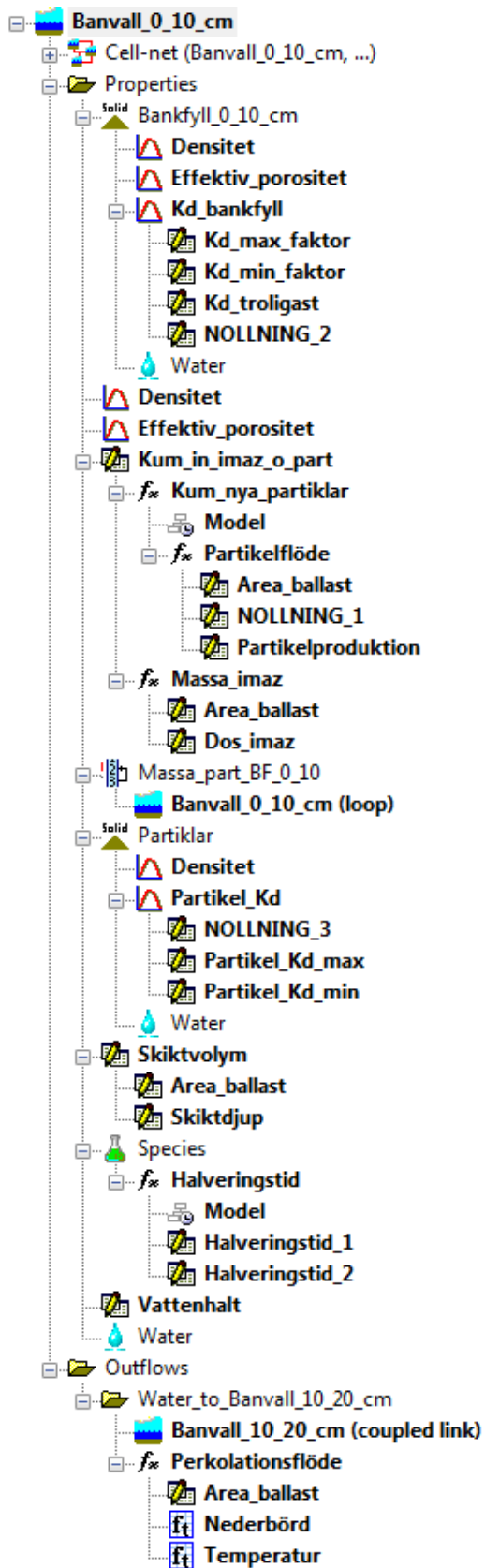
Figur C-3. Banvallens geometri i imazapyrmodellen samt grundvattenvolymen kan sättas här.



Figur C-4. Massa partiklar i banvallen respektive i grundvattnet i imazapyrmodellen.



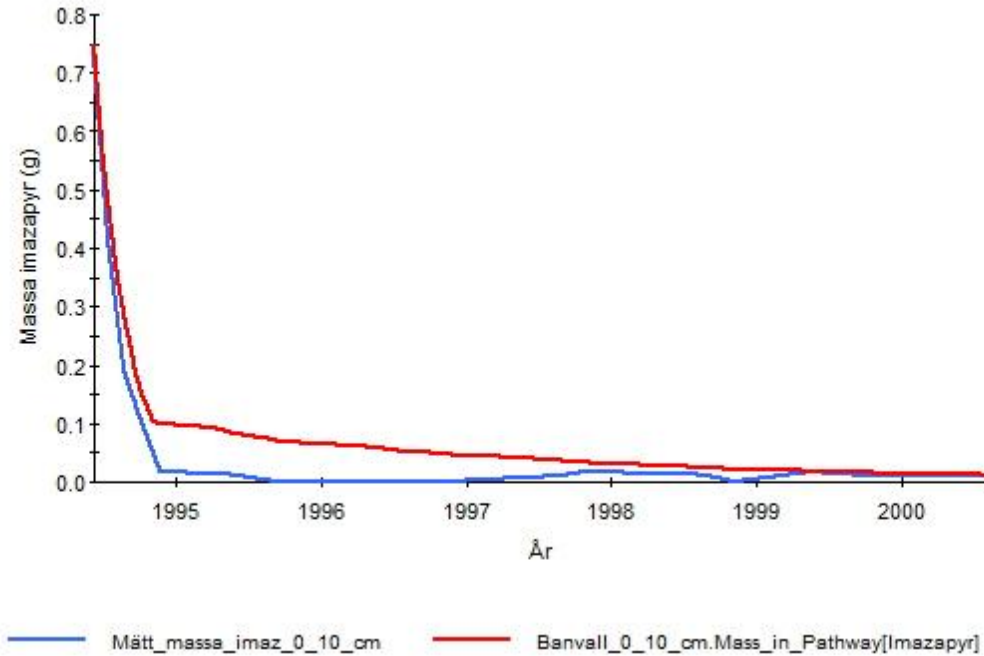
Figur C-5. Uppställning av resultat med osäkerhet i imazapyrmodellen.



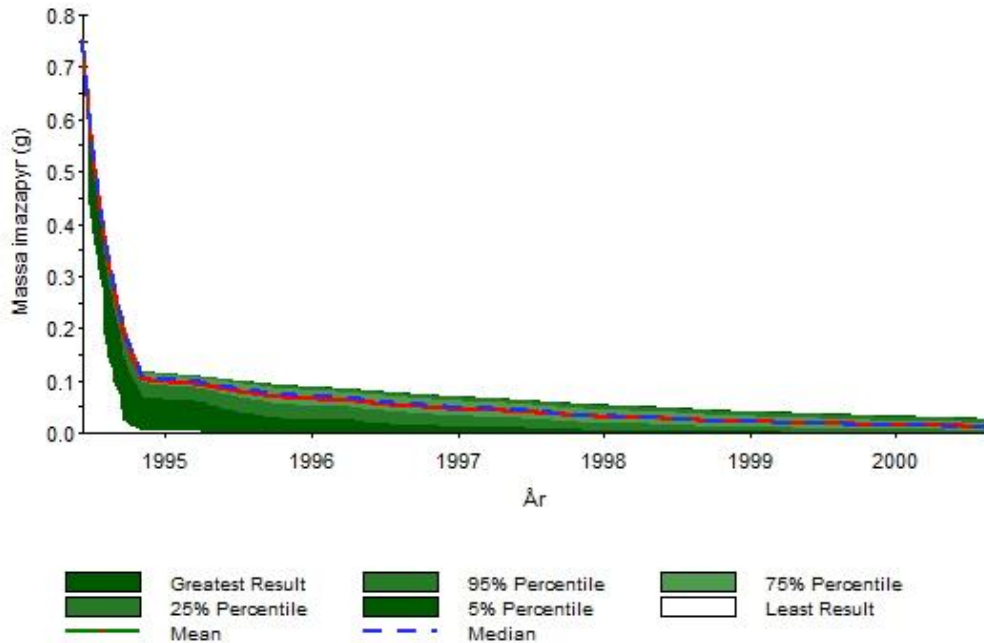
Figur C-6. Översikt av transporten från översta skiktet (0-10 cm) ned till det andra skiktet (10-20 cm).

BILAGA D – RESULTAT IMAZAPYRMODELL

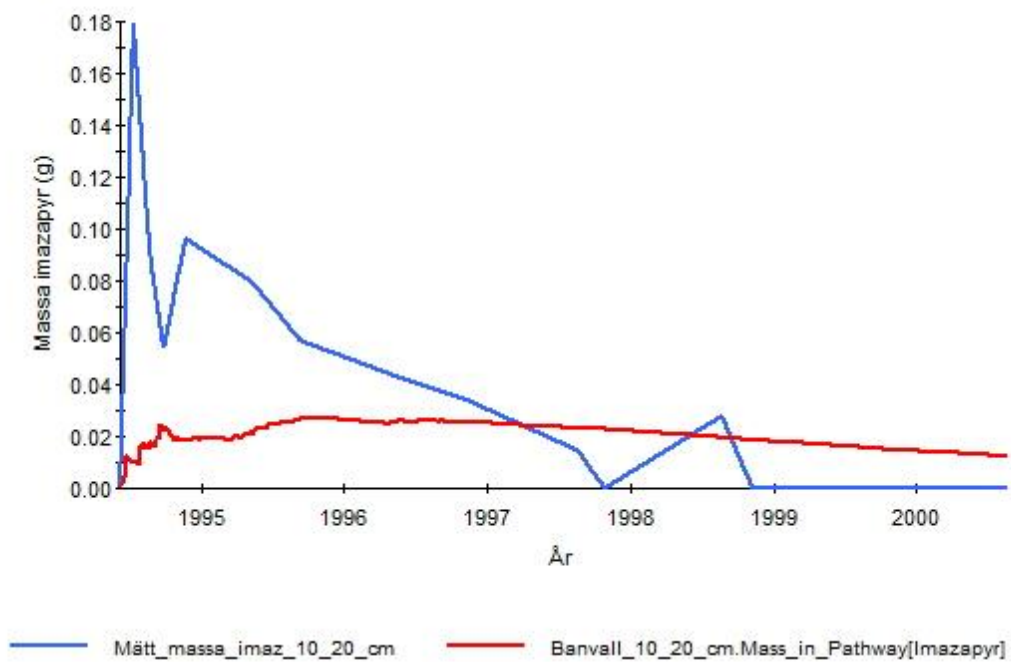
Nedan presenteras simuleringsresultat skikt för skikt de första 50 cm i banvallen. Här redovisas även simuleringsresultaten med angiven osäkerhet, alla för respektive skikt.



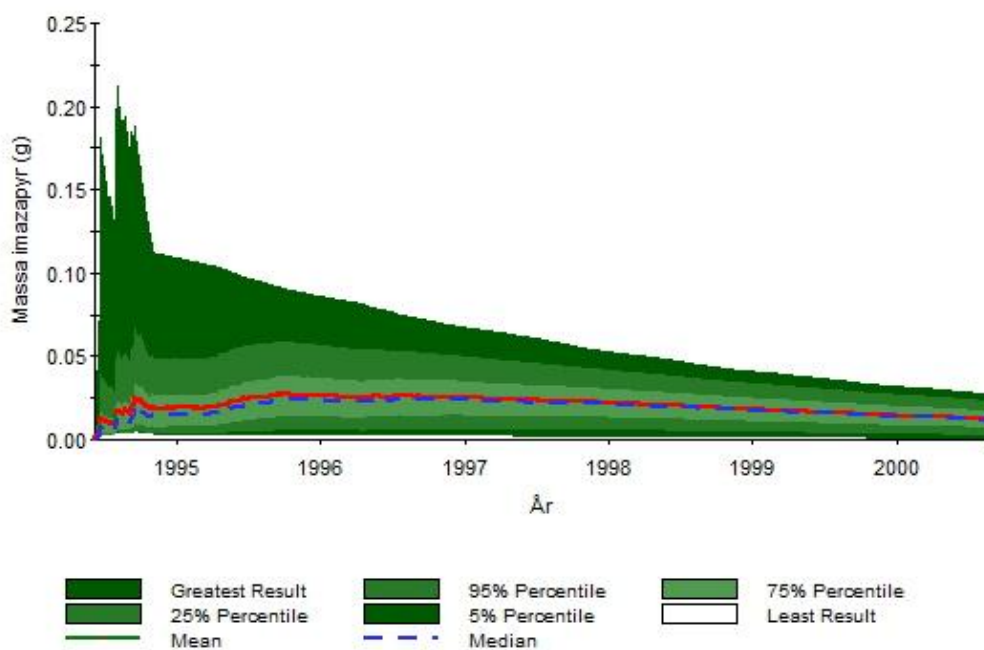
Figur D-1. Massa imazapyr (g) i bankmaterialet i skiktet 0 - 10 cm enligt mätning (blå linje) och enligt simulering (röd linje).



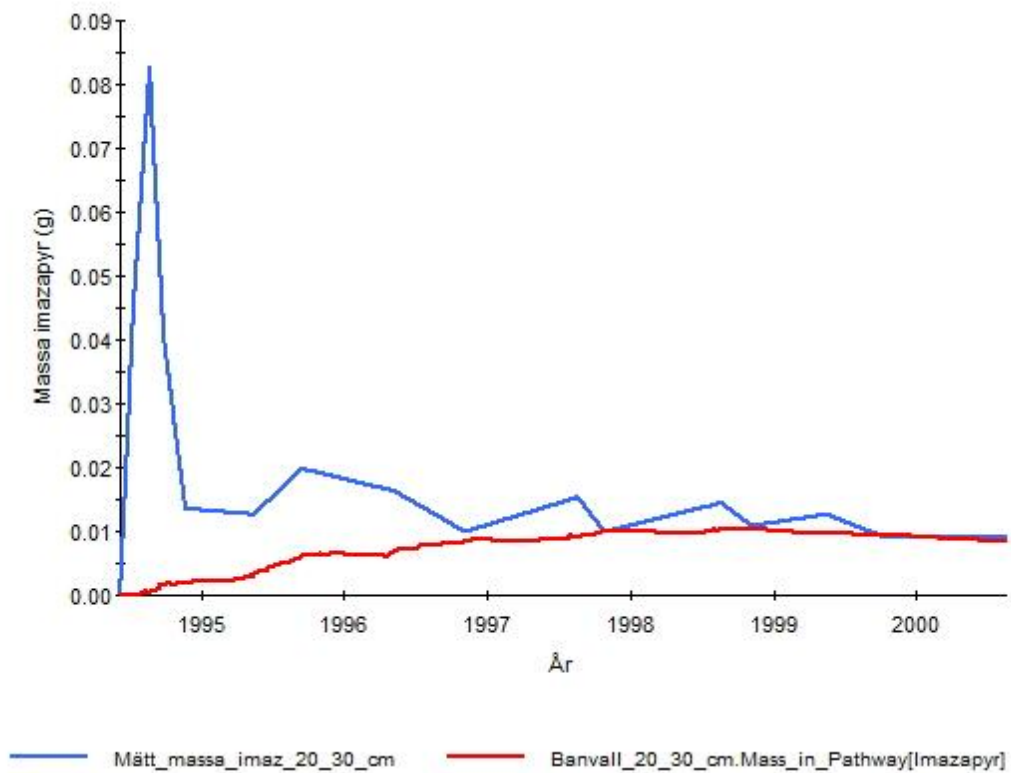
Figur D-2. Massa imazapyr (g) i bankmaterial i skiktet 0 – 10 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



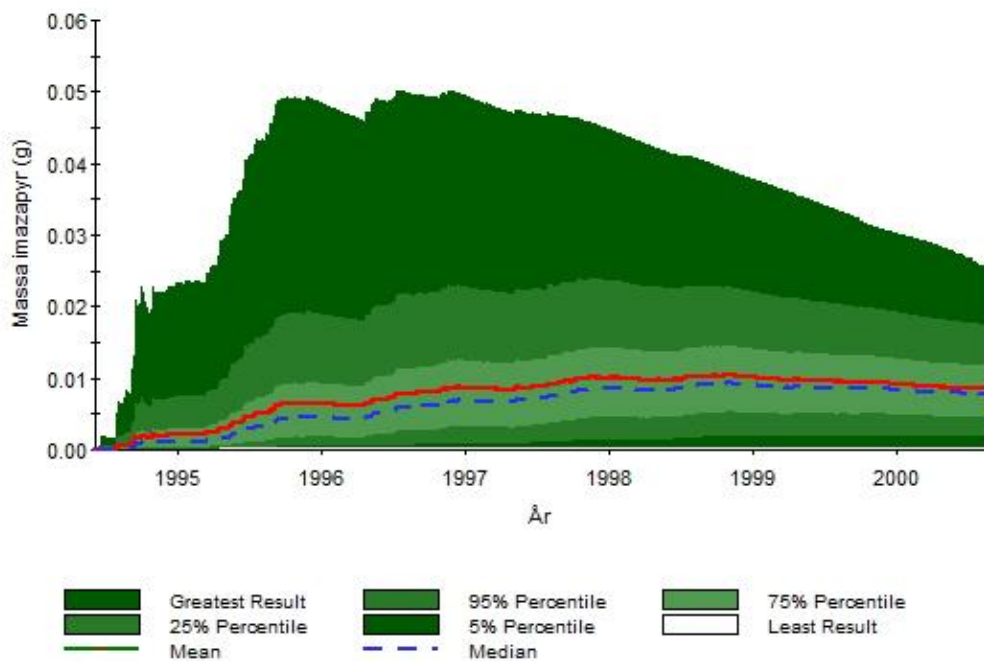
Figur D-3. Massa imazapyr (g) i bankmaterialet i skiktet 10 - 20 cm enligt mätning (blå linje) och enligt simulering (röd linje).



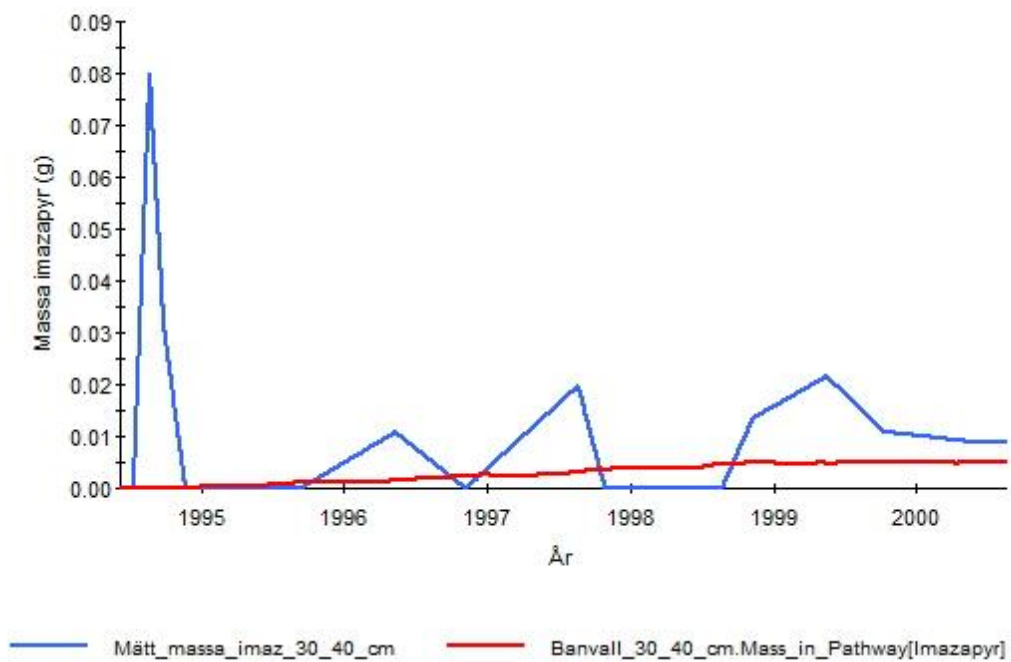
Figur D-4. Massa imazapyr (g) i bankmaterial i skiktet 10 – 20 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



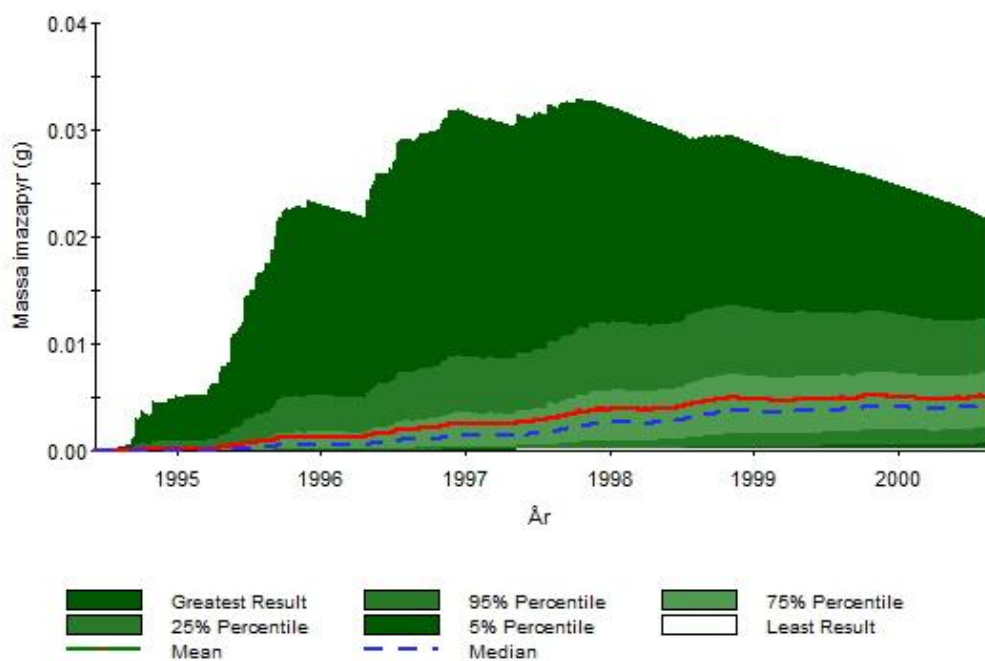
Figur D-5. Massa imazapyr (g) i bankmaterialet i skiktet 20 - 30 cm enligt mätning (blå linje) och enligt simulering (röd linje).



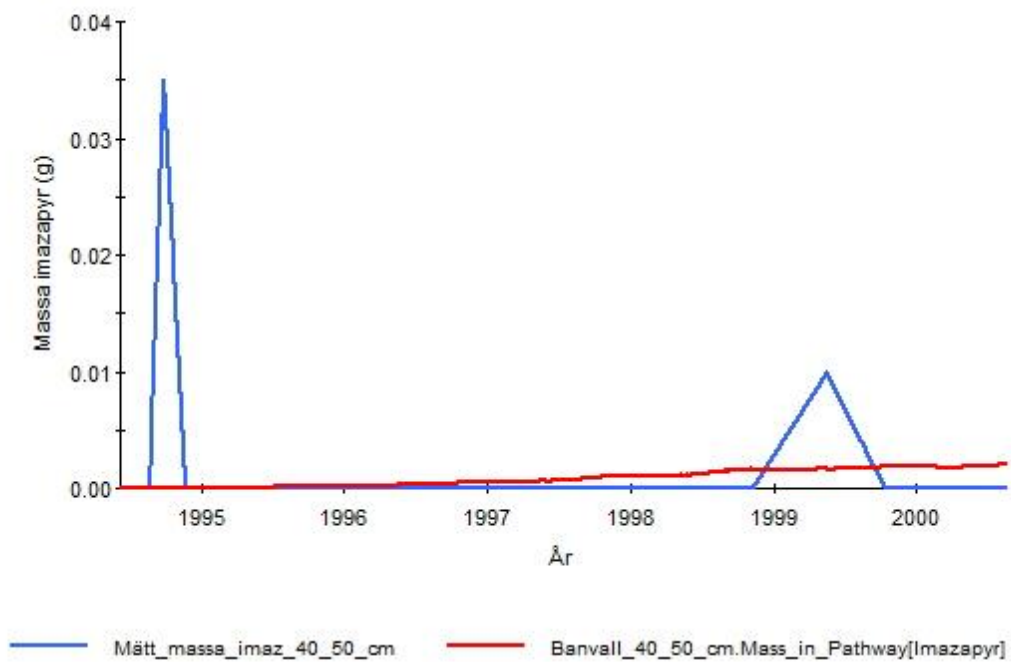
Figur D-6. Massa imazapyr (g) i bankmaterial i skiktet 20 – 30 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



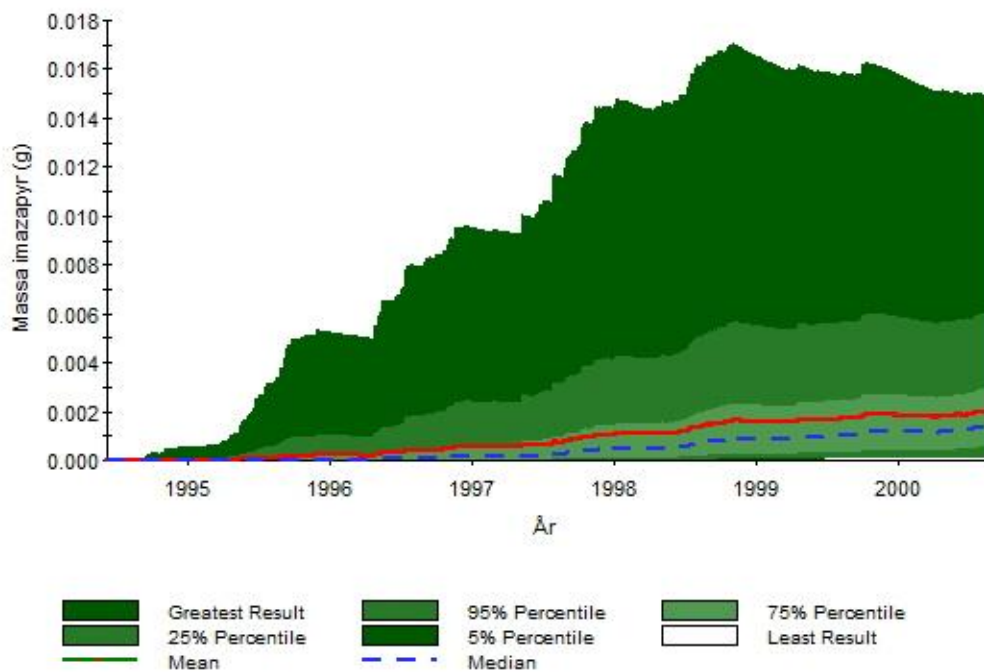
Figur D-7. Massa imazapyr (g) i bankmaterialet i skiktet 30 - 40 cm enligt mätning (blå linje) och enligt simulering (röd linje).



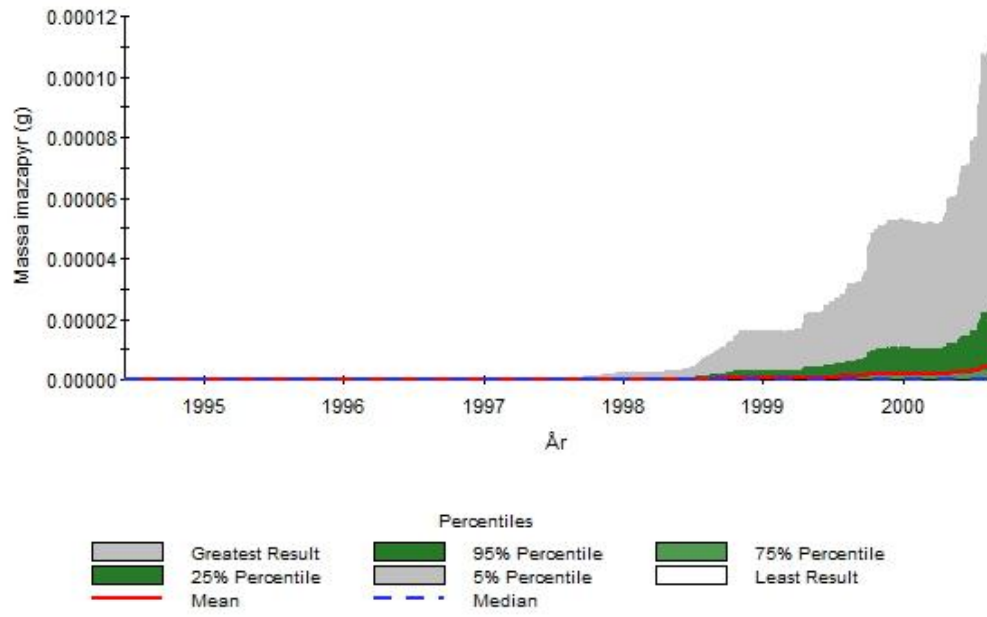
Figur D-8. Massa imazapyr (g) i bankmaterial i skiktet 30 - 40 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



Figur D-9. Massa imazapyr (g) i bankmaterialet i skiktet 40 - 50 cm enligt mätning (blå linje) och enligt simulering (röd linje).



Figur D-10. Massa imazapyr (g) i bankmaterial i skiktet 40 - 50 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



Figur D-11. Massa imazapyr (g) i grundvattnet med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.

BILAGA E – KÄNSLIGHETSANALYS, IMAZAPYRMODELL

Tabell E-1. Parametrar som ändrades i känslighetsanalysen med tillhörande värden (minskning och ökning med 30 och 60 %). För värdet på *Troligast*, se tabell E-2.

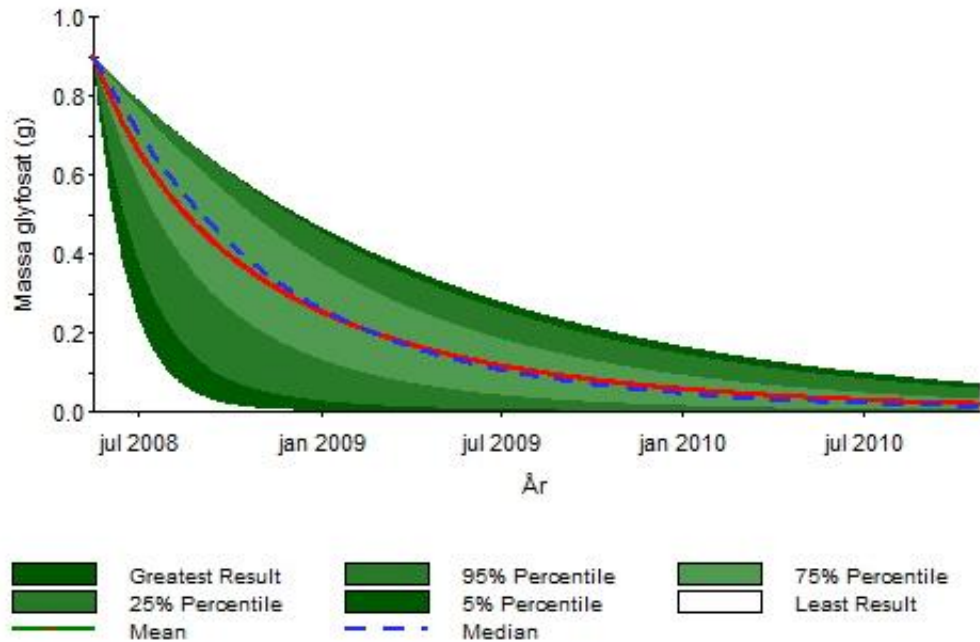
Parameter	Modellnamn	Värde
Avstånd grundvattenytan (m)	Imazapyrmodell_1.1	0,4
	Imazapyrmodell_1.2	0,7
	Imazapyrmodell_START	1
	Imazapyrmodell_1.4	1,3
	Imazapyrmodell_1.5	1,6
Partikelproduktion (µg/m ² /d)	Imazapyrmodell_2.1	0,18
	Imazapyrmodell_2.2	0,315
	Imazapyrmodell_START	0,45
	Imazapyrmodell_2.4	0,585
	Imazapyrmodell_2.5	0,72
Grundvattenvolym (m ³)	Imazapyrmodell_3.1	0,00004
	Imazapyrmodell_3.2	0,00007
	Imazapyrmodell_START	0,0001
	Imazapyrmodell_3.4	0,00013
	Imazapyrmodell_3.5	0,00016
Nederbörd (mm/d)	Imazapyrmodell_4.1	228
	Imazapyrmodell_4.2	399
	Imazapyrmodell_START	570
	Imazapyrmodell_4.4	741
	Imazapyrmodell_4.5	912
Dos imazapyr (kg/ha)	Imazapyrmodell_5.1	0,6
	Imazapyrmodell_5.2	1,05
	Imazapyrmodell_START	1,5
	Imazapyrmodell_5.4	1,95
	Imazapyrmodell_5.5	2,4
Kd-värde i banvall (l/kg)	Imazapyrmodell_7.1	Troligast-2*0,3*Troligast
	Imazapyrmodell_7.2	Troligast-0,3*Troligast
	Imazapyrmodell_START	Troligast
	Imazapyrmodell_7.4	Troligast+0,3*Troligast
	Imazapyrmodell_7.5	Troligast+0,3*2*Troligast
Halveringstid (d)	Imazapyrmodell_8.1	262,4
	Imazapyrmodell_8.2	459,2
	Imazapyrmodell_START	656
	Imazapyrmodell_8.4	852,8
	Imazapyrmodell_8.5	1 049,6

Tabell E-2. Uppmätta K_d-värden i varje skikt från provplatserna 760 samt 763 vid Ina – Söderhamn samt beräknade medelvärden av dessa som ger K_d-troligast i bankmaterialet (Börjesson m.fl., 2004).

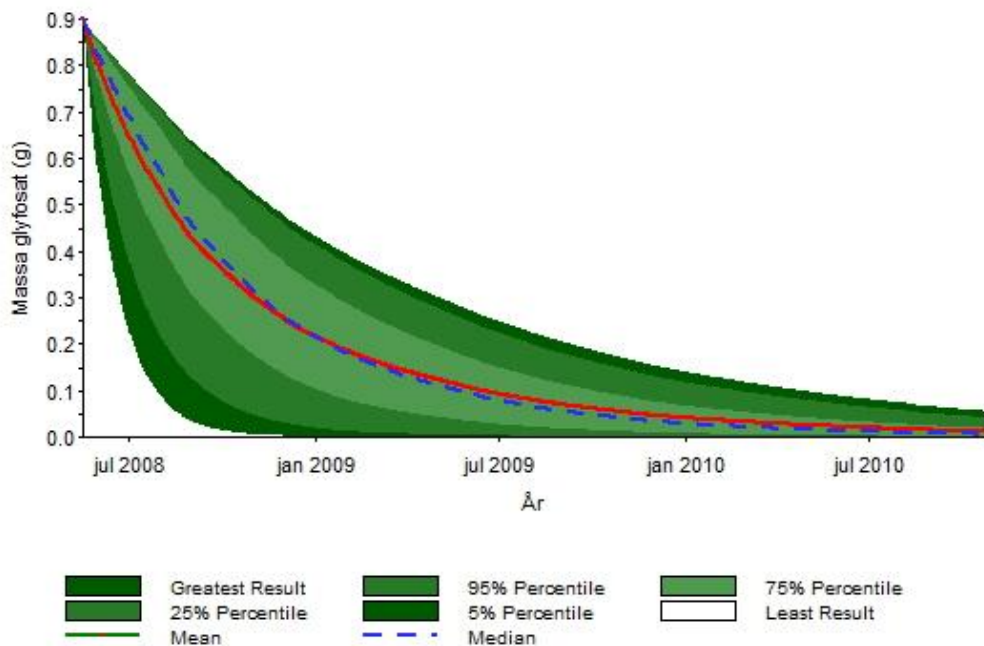
Skikt (cm)	K_d, provpunkt 760 (l/kg)	K_d, provpunkt 763 (l/kg)	K_d-troligast (l/kg)
0 - 10	7,8	5,5	6,65
10 - 20	5,9	5,9	5,90
20 - 30	5,5	4,6	5,05
30 - 40	4,8	4,4	4,60
40 - 50	2,0	2,7	2,35
50 - 60	2,5	2,9	2,70
60 - 70	2,9	3,1	3,00
70 - 80	5,7	2,8	4,25
80 - 90	12,0	4,1	8,05
90 - 10	15,5	9,3	12,4

BILAGA F – RESULTAT GLYFOSATMODELL

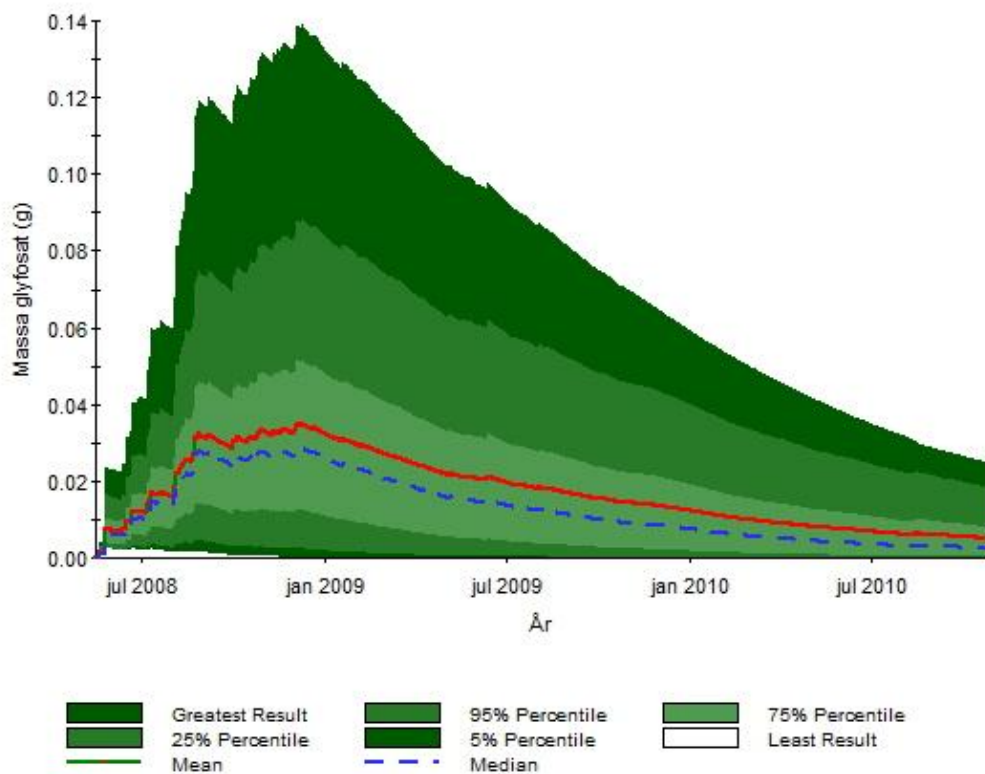
I denna bilaga redovisas resultat från simulering med glyfosat (figur F-1 till figur F-6) och dess nedbrytningsprodukt AMPA (figur F-7 till F-12) med angivna osäkerheter.



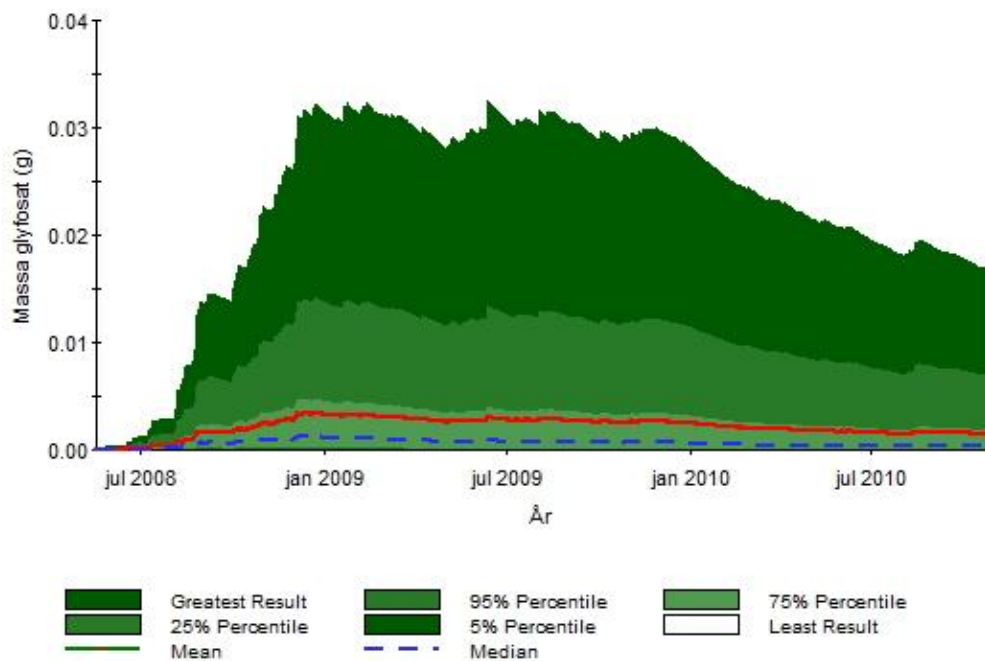
Figur F-1. Massa glyfosat (g) i bankmaterial i skiktet 0 – 50 cm med angiven osäkerhet i simuleringresultat.



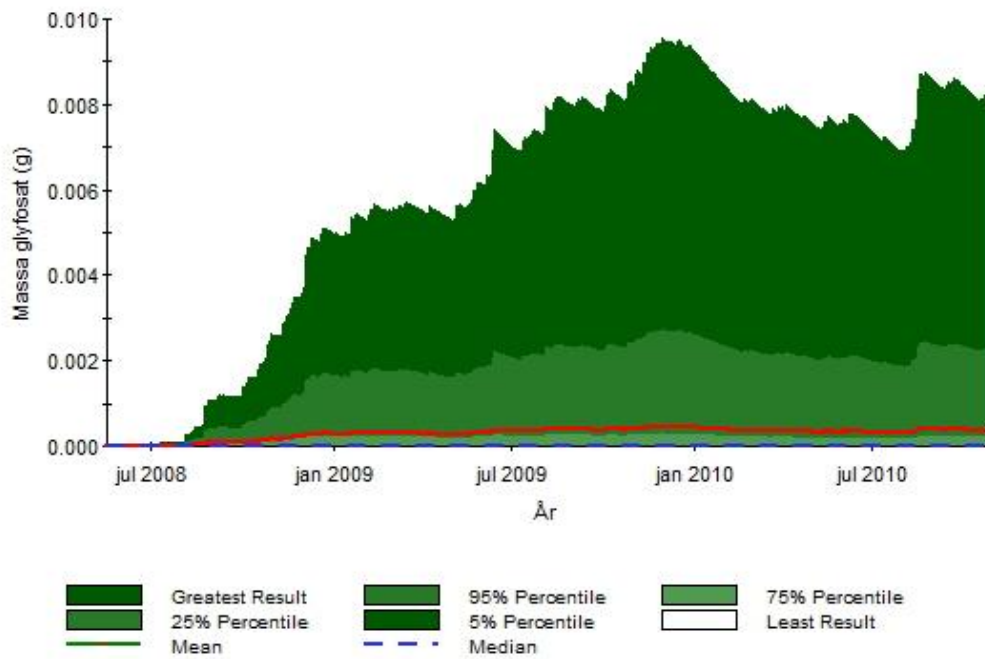
Figur F-2. Massa glyfosat (g) i bankmaterial i skiktet 0 – 10 cm med angiven osäkerhet i simuleringresultat.



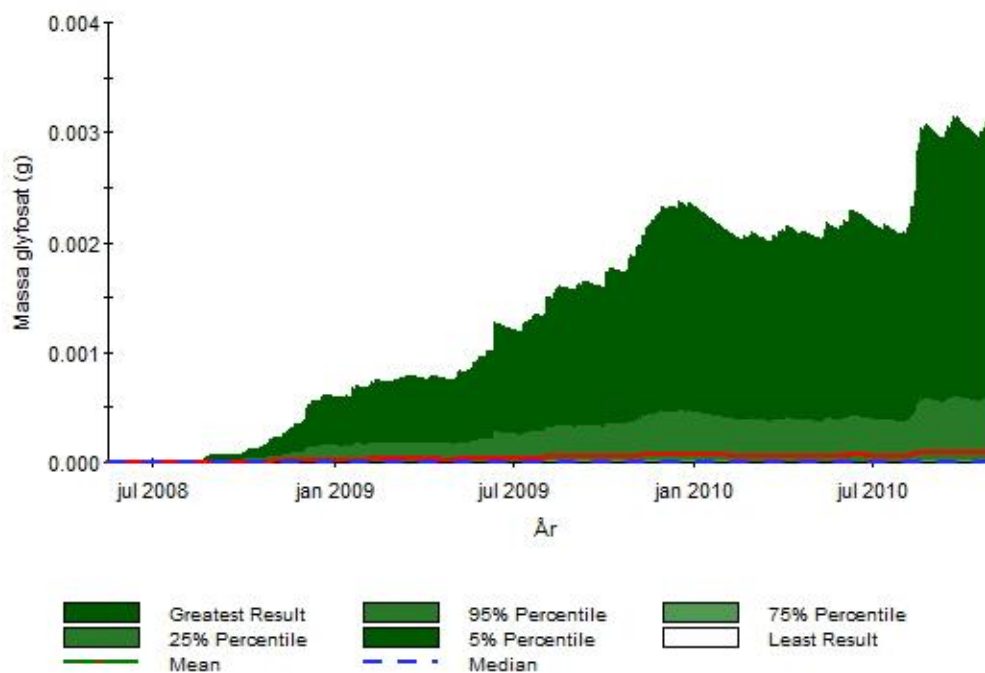
Figur F-3 Massa glyfosat (g) i bankmaterial i skiktet 10 – 20 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



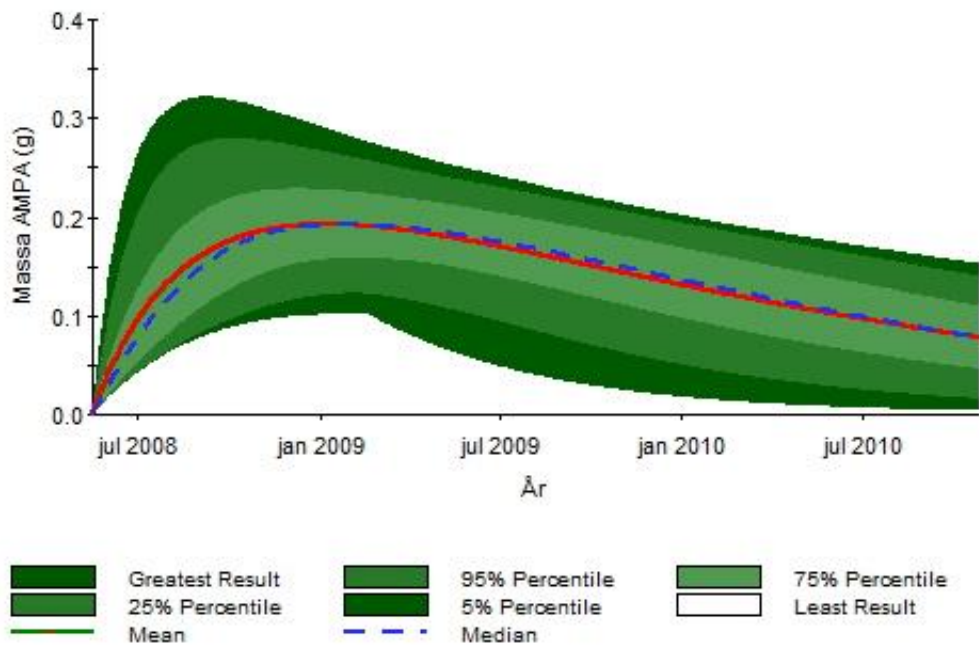
Figur F-4 Massa glyfosat (g) i bankmaterial i skiktet 20 – 30 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



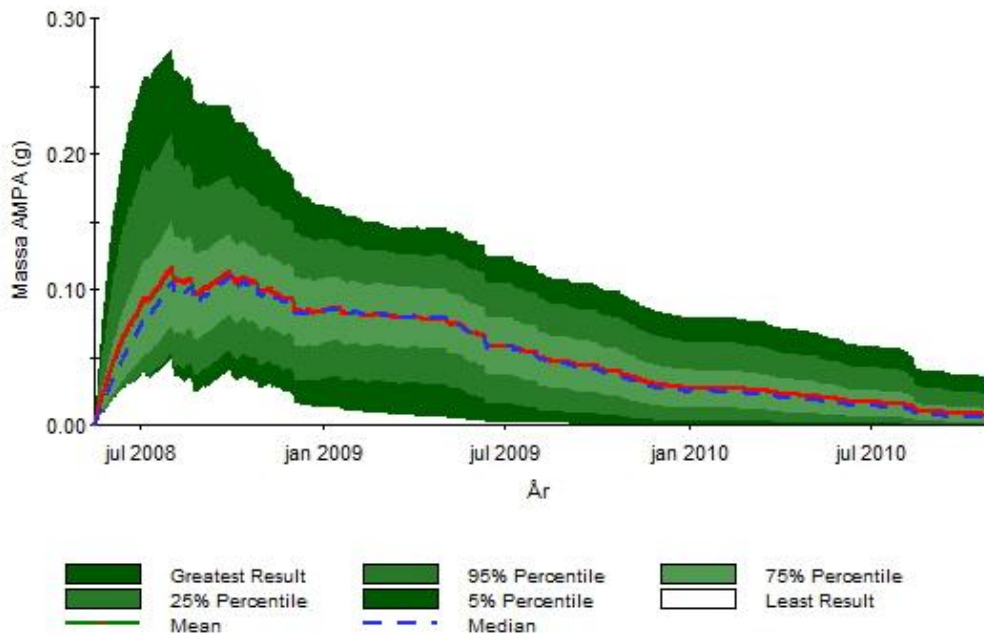
Figur F-5. Massa glyfosat (g) i bankmaterial i skiktet 30 – 40 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



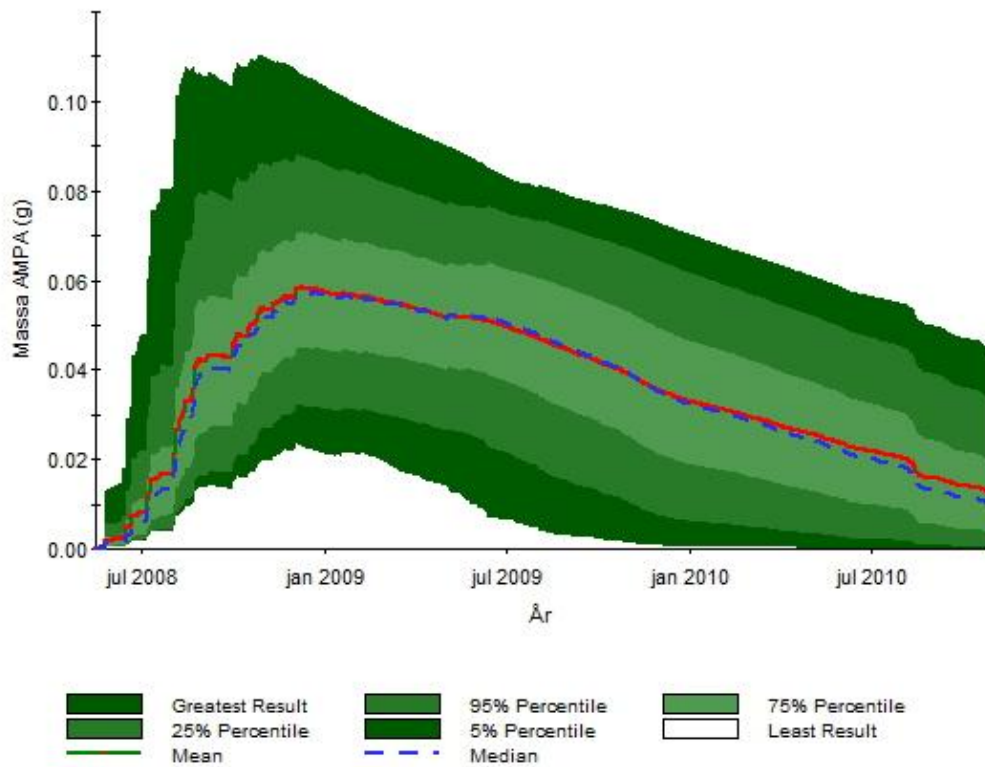
Figur F-6. Massa glyfosat (g) i bankmaterial i skiktet 40 – 50 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



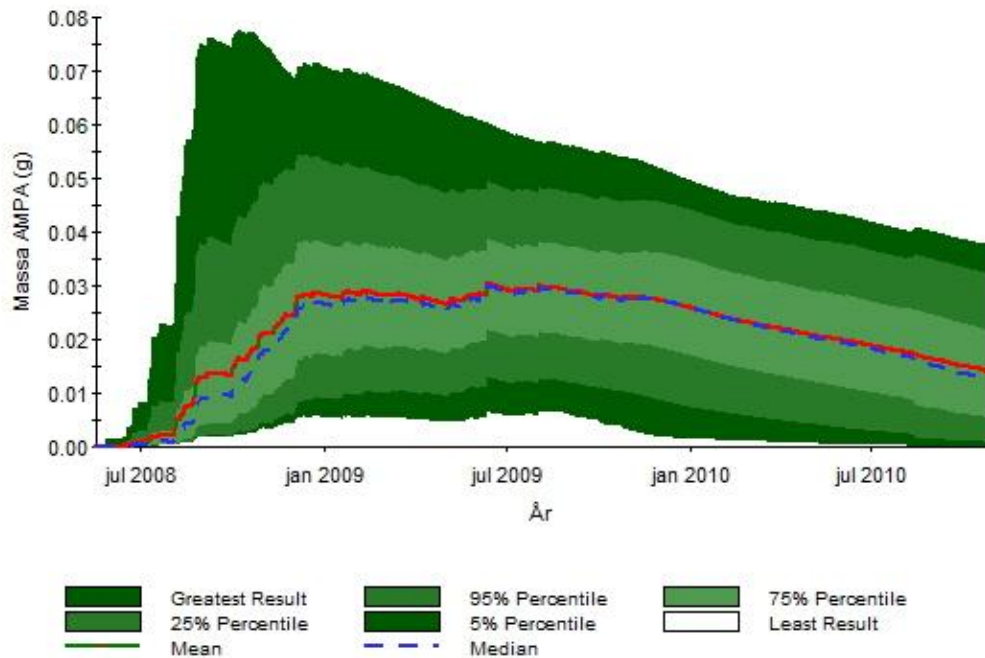
Figur F-7. Massa AMPA (g) i bankmaterial i skiktet 0 – 50 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



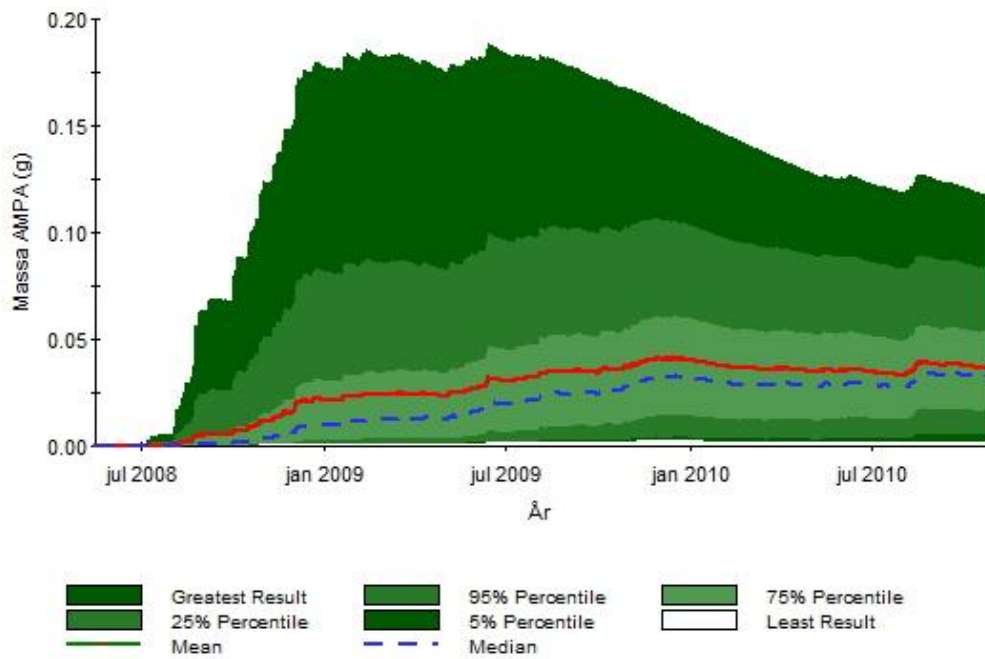
Figur F-8. Massa AMPA (g) i bankmaterial i skiktet 0 – 10 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



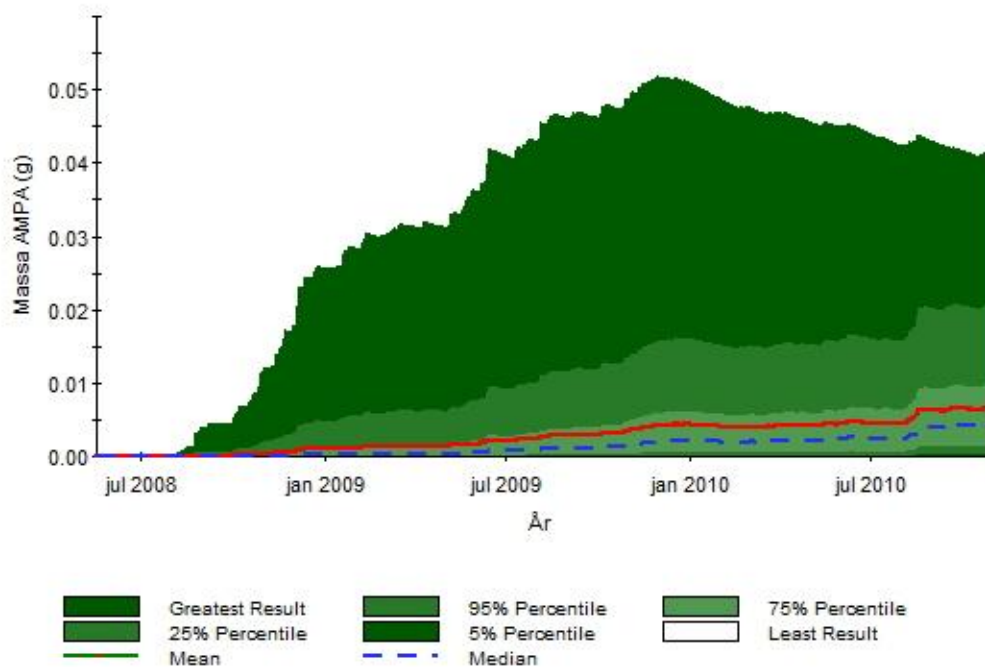
Figur F-9. Massa AMPA (g) i bankmaterial i skiktet 10 – 20 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



Figur F-10. Massa AMPA (g) i bankmaterial i skiktet 20 – 30 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



Figur F-11. Massa AMPA (g) i bankmaterial i skiktet 30 – 40 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.



Figur F-12. Massa AMPA (g) i bankmaterial i skiktet 40 – 50 cm med angiven osäkerhet i simuleringsresultat.