Elv og grunnvann

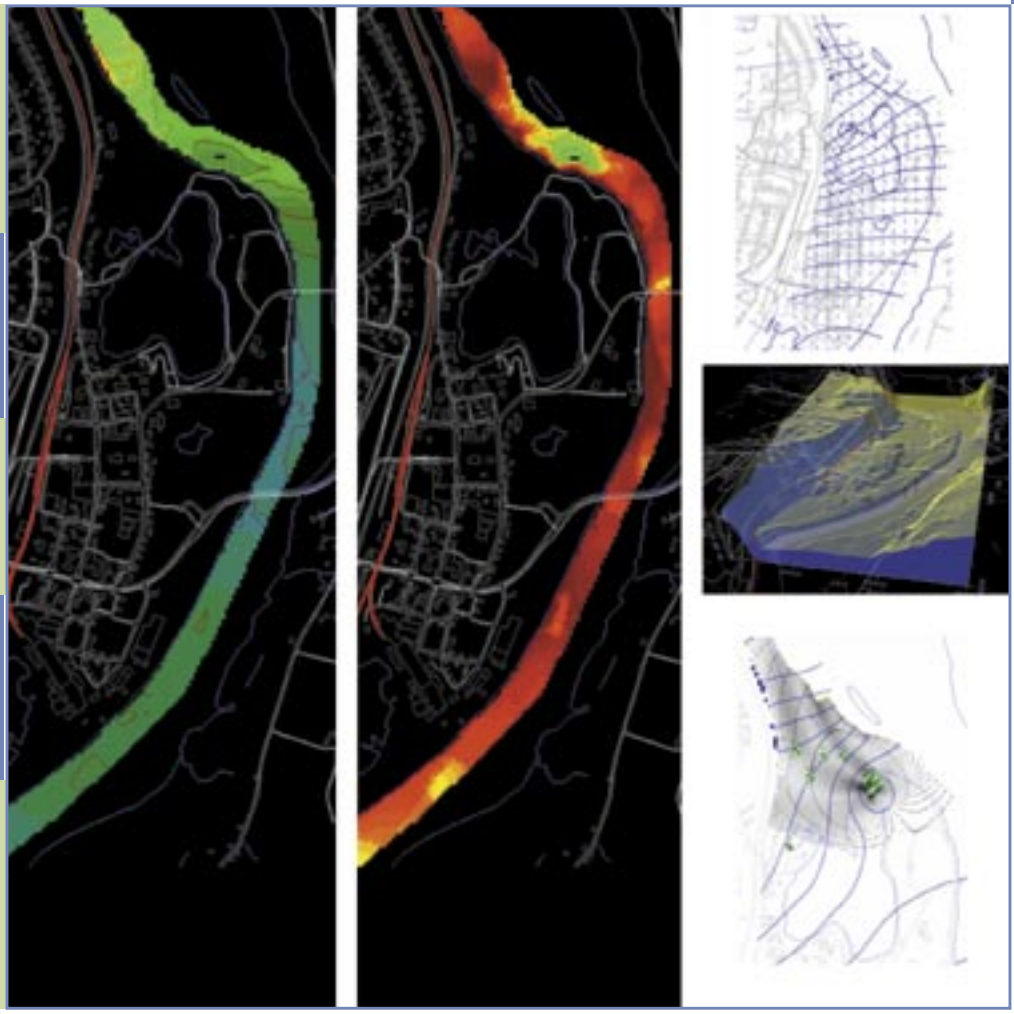
Analyse av interaksjon mellom et grunnvanns-magasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z)

Rapport 3. Grunnvannsmodellering

Hervé Colleuille, NVE
Wai Kwok Wong, NVE
Panagiotis Dimakis, NVE

3
2004

RAPPORT MILJØBASERT VANNFØRING



FoU-programmet Miljøbasert vannføring

Programmet Miljøbasert vannføring har som mål å skaffe økt kunnskap om virkninger av sterkt redusert vannføring i vassdrag, slik at forvaltningen får et bedre faglig grunnlag for å fastsette vannføringen ved inngrep i vassdrag. Dette er aktuelt i forbindelse med nye vassdragskonsesjoner, revisjon av vilkår i gamle konsesjoner og som følge av den nye vannressursloven og EUs rammedirektiv for vann. Programmet finansieres av Olje- og energidepartementet og er forankret i Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).

Programmets fase I har en tidsramme på fem år (2001-2005). Programmet er organisert med en styringsgruppe, bestående av representanter fra NVE med lederansvar, energibransjen, naturforvaltningen og interesseorganisasjoner, og et fagutvalg der ulike fagområder er representert. Den daglige ledelse og administrasjon av programmet er knyttet til Vannressursavdelingen i NVE.

Elv og grunnvann

Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z)

Rapport 3. Grunnvannsmodellering

Norges vassdrags- og energidirektorat
2004

Rapport nr. 3-2004

Elv og grunnvann

Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z)

Rapport 3. Grunnvannsmodellering

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Forfattere: Hervé Colleuille, Wai Kwok Wong og Panagiotis Dimakis

Trykk: NVEs hustrykkeri
Opplag: 100
Forsidefoto: Hervé Colleuille
ISSN: 1502-234X
ISBN: 82-410-0493-1

Sammendrag: Denne rapporten beskriver hvordan grunnvannsmodellen på Rena er bygd opp, kalibrert, validert og anvendt som analyseverktøy. Betydningen av vassdragsinngrep (redusert vannføring og endringer i egenskaper til elvas bunnsedimenter) på grunnvanns-ressurser og dets interaksjon med elvevann er analysert. Innvirkning av grunnvannsfornyelse og grunnvannsuttak på elvevannets kvalitet og kvantitet er også evaluert.

Emneord: Grunnvann, vannføring, akvifer, modellering, følsomhetsanalyse, vannbalanse, Åmot kommune.

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

Januar 2004

Innhold

Forord 6

Sammendrag 7

1. Innledning 8

1.1. Visual Modflow 9
1.2. Modellprosedyrer 10
1.3. Formål med modellarbeid på Rena 11

2. Konseptuell modell og modelloppbygging 12

2.1. Modellområdet 14
2.2. Hydrostratigrafiske enheter 17
2.3. Fysisk rammeverk og gridding 20
2.4. Modellbetingelser 23

3. Kalibrering og verifisering 29

3.1. Kalibrering 29
3.2. Verifisering 42

4. Følsomhetsanalyser 45

4.1. Analyse av Pests resultater 45
4.2. Betydning av antall tidssteg og tidsenheter 47
4.3. Følsomhet til enkelte parametre 53

5. Analyser 57

5.1. Strømningsforhold og vannutveksling 57
5.2. Effekt av endringer i grunnvannsdannelse 67
5.3. Effekt av endringer i egenskapene til bunnsedimenter 74
5.4. Effekt av endringer i elvevannstand 82
5.5. Effekt av reguleringen i Glomma 89
5.6. Effekt av grunnvannsuttak 95

6. Konklusjoner 109
Referanser 115

Forord

FoU-programmet Miljøbasert vannføring har som mål å forbedre kunnskapsgrunnlaget for å kunne fastsette vannføring etter inngrep som reduserer den naturlige vannføringen. Det er bl.a. viktig å avklare betydningen av samspillet mellom grunnvann og elvevann, noe som kan ha stor betydning for elveøkosystemet. I dette prosjektet fokuseres det på forståelse av de fysiske forholdene som styrer interaksjon mellom grunnvann og elvevann. Formålet er å utvikle analyseverktøy for å kunne kvantifisere og forutsi effekt av redusert vannføring på grunnvann og effekten av grunnvannsuttak på vannføring. Prosjektet har direkte interesse for forvaltningen ved konsesjonsbehandling, både ved grunnvannsuttak og ved fastsettelse av redusert vannføring.

I prosjektet er to ulike typer vassdrag undersøkt: et stort vassdrag med stor sedimentering på Østlandet (Glomma), og et lite vassdrag på Vestlandet (Osa). Resultatene av undersøkelsene, utført på en elveslette langs Glomma på Rena i Hedmark, publiseres nå i tre rapporter. Rapportene er relativt omfattende fordi de er ment som et oppslagsverk for saksbehandlere i forvaltning og for konsulenter.

Rapporten **"Formål og metoder"** gir en oversikt over bakgrunn og formål med prosjektet, samt en beskrivelse av de metoder som er anvendt på Rena for anskaffelse, systematisering og analysering av dataene. Rapporten **"Materiale og feltmålinger"** er en dokumentasjon av alle forhold og data (arealutnytting, geologi, hydrologi, klimatologi, vassdragsinngrep, grunnvannsuttak, hydrokjemi) som er av interesse for analyse av grunnvannsbevegelser i grunnvannsmagasinet og dets interaksjon med Glomma. Rapporten **"Grunnvannsmodellering"** beskriver hvordan grunnvannsmodellen på Rena er bygd opp, kalibrert, validert og anvendt som analyseverktøy. En sammenfattende konklusjon finnes sist i den tredje rapporten.

Når feltstudier fra Osavassdraget er avsluttet, skal det utarbeides en kortfattet forvaltningsrettet rapport som binder sammen generell kunnskap og erfaringer fra de to grunnvannsområdene.

Oslo, januar 2004

Haavard Østhagen
leder styringsgruppe

John Brittain
programleder

Sammendrag

Generell målsetning med prosjektet er å øke kunnskapen om interaksjon mellom grunnvann og elvevann. Hovedformålet er å utvikle analyseverktøy for å kunne kvantifisere og forutsi effekt av redusert vannføring på grunnvann, og samtidig effekt av grunnvannsuttak på vannføring og vannkvalitet. Det er valgt å analysere som først tilfellestudie en elveslette langs Glomma på Rena i Hedmark.

Denne rapporten beskriver hvordan grunnvannsmodellen på Rena er bygd opp, kalibrert, validert og anvendt som analyseverktøy. Betydningen av vassdragsinngrep (redusert vannføring og endringer i egenskaper til elvas bunnsedimenter) på grunnvannsressurser og dets interaksjon med elvevann er analysert. Innvirkning av grunnvannsfornyelse og grunnvannsuttak på elvevannets kvalitet og kvantitet er også evaluert.

1. Innledning

Samspill mellom grunnvann og elvevann er vesentlig for vannkvalitet, vanntemperatur og ferskvannsøkologi. Generell målsetning med prosjektet er å øke kunnskapen om interaksjon mellom grunnvann og elvevann. Hovedformålet er å utvikle analyseverktøy for å kunne kvantifisere og forutsi effekt av redusert vannføring på grunnvann og samtidig effekt av grunnvannsuttak på vannføring og vannkvalitet. Mer informasjon om bakgrunn, problemstilling, formål og prosedyrer er presentert i rapport 1.

Et tredimensjonalt grunnvannsmodellverktøy er anvendt i dette prosjektet for å kvantifisere interaksjon mellom grunnvann og overflatevann. Modellen er kalibrert på grunnlag av hydrogeologiske data samlet i felt. Alt bakgrunnsmateriale, og resultatene fra feltundersøkelser er tidligere presentert i rapport 2.

Denne rapporten presenterer hvordan vi bygger opp, kalibrerer og anvender en grunnvannsmodell for å kvantifisere vannutvekslingen mellom Glomma og grunnvannsmagasinet i løpet av et normalt hydrologisk år med snøsmelting, vårflom og lavvannføring. Modellverktøyet benyttes også for å analysere betydningen av endret vannføring (elveregulering), og mulige konsekvenser av endringer i bunnsedimenter (permeabilitet og mektighet) på grunnvannsressurser og deres interaksjon med elvevann. Til slutt evalueres innvirkning av grunnvannsfornyelse og grunnvannsuttak på elvevannets kvalitet og kvantitet.

Visual Modflow er navnet på et analyseverktøy som NVE bruker for grunnvannsanalyser. Visual Modflow er en 3D strømnings- og forurensningstransportmodell for den mettede sone. Et viktig tilleggsformål med dette prosjektet på Rena er å vinne erfaring med bruk av modellverktøy. Et langsiktig mål er å utvikle generelle metoder for en best mulig utnyttelse av geologisk og hydrologisk informasjon for konsistente analyser av grunnvannet. Vi har i denne rapporten valgt å beskrive prosedyrene som vi har benyttet for først å bygge opp og kalibrere en modell, og deretter for å evaluere hydrologiske effekter av grunnvannsuttak, vassdragsregulering eller klimaendringer gjennom endringer i grunnvannsdannelse. Utvikling av gode simuleringsprosedyrer er et viktig mål i seg selv i dette arbeidet.

Kalibreringen og analysene i dette arbeidet er utført med modellverktøyet Modflow. Modflow er et relativt brukervennlig kommersielt produkt, godt kjent og benyttet av mange forskningsinstitusjoner og konsulentfirmaer over hele verden.

Parallellt var det også brukt et annet modellverktøy: Feflow. Som modellverktøy, er Feflow mer komplisert å ta i bruk, men tillater utførelse av en rekke type analyser som ikke kan utføres med Modflow. Feflow kan f. eks. anvendes til å simulere utvekslingen av energi mellom grunnvann og overflaten, og på denne måten analysere innvirkning av elveregulering på grunnvannstemperatur. Tankegangen var også å bruke observasjonene av vanntemperatur i elva og under bunnsedimenter (miljøindikatoren) for å kalibrere og kontrollere vannutvekslingsmengde mellom grunnvannet og elva. Arbeidet med Feflow er ikke beskrevet i denne rapporten

1.1. Visual Modflow

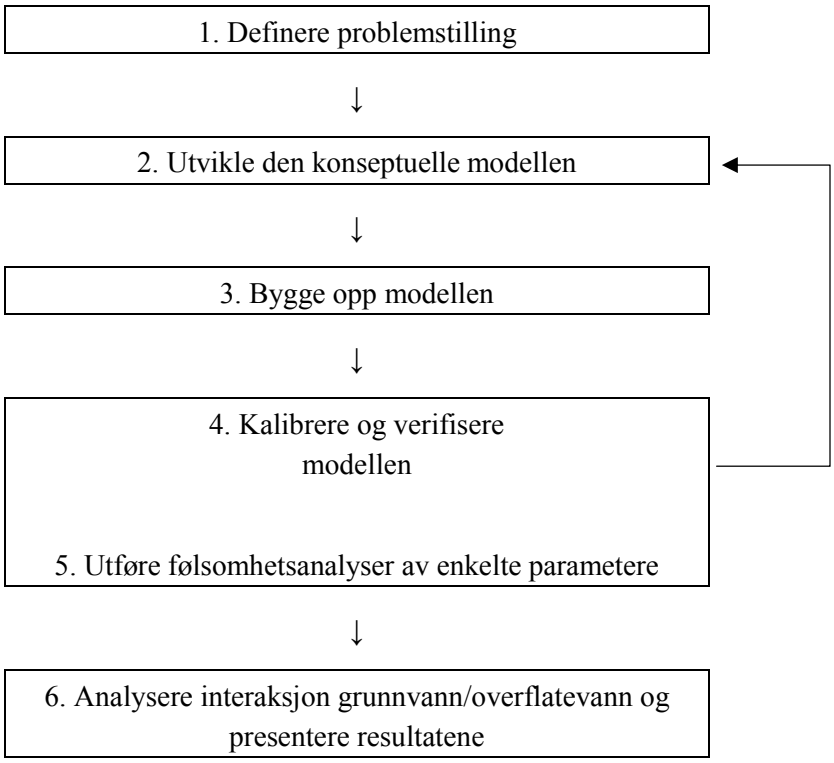
Visual Modflow er et modellverktøy for analyse av tredimensjonal grunnvannsstrømning og transport av stoffer i mettet sone. Visual Modflow betraktes ofte som det mest brukervennlige programmet for 3D strømnings- og forurensningstransportmodellering av grunnvannet. Programmet Modflow (McDonald og Harbaugh, 1988) er opprinnelig utviklet av U.S. Geological Survey og benyttes i mer enn 10.000 rådgivningsfirma, utdannings-, forsknings- og offentlige institusjoner i 90 ulike land. I dette arbeidet har vi tatt i bruk programmet Visual Modflow Pro (Versjon 3.0) som støtter Modflow 2000. Programmet som er utviklet og kommersialisert av WHI (Waterloo Hydrogeologic Inc., Canada) kombinerer Modflow, Modpath, MT3D/RT3D, ZoneBudget og WinPEST i et grafisk grensesnitt.

Modflow benytter endelig-differanse-metoden til å løse grunnvannets strømningslikninger i tre dimensjoner. Programmet gir mulighet til å beregne stasjonær eller tidsavhengig strømning. Modellen blir bygd opp av rektangulære celler og beregner grunnvannstrykket i hver celle (i cellens sentrum), som en funksjon av de omkringliggende cellene og grunnvannstrykket i forrige tidssteg. På denne måten kan modellen simulere utvikling av grunnvannstrykket i hver celle med tiden. I modellen beregnes strømningsveier og vanntransporttid med Eulers integrasjon (modul Modpath).

Modpath (Pollock, 1994) er et program som sporer bevegelsen til vannpartiklene. Programmet bruker resultatene fra Modflow til å bestemme grunnvannsstrømningslinjer og grunnvannets hastighet i magasinet. MT3D/RT3D (Zheng, 1993) er programmer som simulerer tredimensjonal forurensningstransport i grunnvannet. Prosessene som kan modelleres er adveksjon, dispersjon og kjemiske reaksjoner i grunnvannet. ZoneBudget anvendes for å utføre vannbalanseberegning. WinPest er et program som anvendes for automatisk estimering av enkelte parametere som hydraulisk ledningsevne og porøsitet.

1.2. Modellprosedyrer

Alle steg med modellarbeid på Rena er framstilt nedenfor i figur 1.



Figur 1. Ulike steg ved modellarbeid på Rena.

Det første steget er å fastsette formålet med modellen på Rena. Utvikling av en konseptuell modell innebærer at alle viktige hydrogeologiske enheter og grensebetingelser til systemet er definert. Arbeidet utføres på grunnlag av anskaffet data (feltmålinger og bakgrunnsmateriale, se rapport 2).

Ved oppbygging av modellen er den konseptuelle modellen omsatt i en digital form egnet for modellering. Dette steget inkluderer oppbygging av gridet, valg av tidsparametere, bestemmelse av grensebetingelser og preliminært valg av modellparameter.

Kalibrering utføres for å finne et parametersett som reproduserer de mest relevante observasjonene. Samtidig er det viktig at parametrene gjenspeiler de geologiske forholdene på en mest mulig realistisk måte. Kalibrering utføres delvis automatisk med WinPest. Det utføres en verifisering av modellen ved å kjøre modellen med det aktuelle parametersett til å simulere et nytt sett av feltdata. Det er usikkerhet ved bestemmelsen av grensebetingelser og modellparameter. Følsomhetsanalyser utføres for å vurdere hvilke parametere som har mest innflytelse på simuleringsresultater. Ved automatisk kalibrering får man direkte informasjon om parameterfølsomhet.

Det siste steget gjelder å kjøre ulike scenarier for å analysere effekt av endring i en parameter (f. eks. elvevannstand, permeabilitet til bunnsedimenter, effektiv nedbør, eller uttaksmengde av vann) på vannutveksling mellom grunnvannsforekomsten og Glomma.

1.3. Formålet med modellarbeid på Rena

Det første steget i modellarbeidet er å identifisere tydelig formålet med arbeidet slik at man kan bestemme størrelsesorden til modellinnsatsen. Det er nødvendig å vurdere hvilke spørsmål modellen vil kunne svare på. Nedenfor er aktuelle spørsmål vedrørende grunnvannsressursene i Rena og deres interaksjon med overflatevann listet opp:

Strømnings- og infiltrasjonsforhold:

- Hva er de naturlige strømningsforholdene ved ulike årstider (snøsmelting, høy vannføring ved flom, lavvannføring sommer- og vinterstid)?
- Når, hvor og hvor mye vann infiltreres fra Glomma inn i akviferen på Rena, og fra akviferen til Glomma?

Virkninger av redusert vannføring for grunnvann:

- Hva er effekt av endring i elvevannstand?
- Hva er effekt av endring i sedimentasjonsforhold?
- Kan endring i vannføring forårsake endringer i grunnvannets oppholdstid?
- Hvordan vil en regulering kunne påvirke grunnvannets kvalitet og kvantitet?

Utnyttelse av grunnvannsressurser:

- Hva er effekt av grunnvannsuttak på strømningsforhold og utvekslingsmengde mellom overflatevann og grunnvann?
- Hva er vannets oppholdstid i magasinet ved grunnvannsuttak?
- Er eksisterende beskyttelsessoner rundt reservekilden tilfredsstillende?
- Kan elveregulering ha betydning for kvaliteten på grunnvann som tas ut?

2. Konseptuell modell og modell-oppbygging

Oppbyggingen av grunnvannsmodellen er gjort med bakgrunn i de tilgjengelige dataene for geometriske, geologiske, hydrologiske og menneskeskapte elementer i terrenget som ble presentert tidligere i rapport 2. Det gis i dette kapitlet en beskrivelse av hvordan vi implementerer den konseptuelle modellen for Rena i en numerisk modell, og hvordan man har definert de ulike hydrostratigrafiske enheter og grensebetingelser som definerer denne modellen.

En konseptuell modell representerer vår oppfatning/forståelse/tolkning av grunnvannsforholdene i et område. Ved oppbygging av modellen er den konseptuelle modellen forenklet og omsatt i en digital form egnet for modellering. Forenkling er helt nødvendig fordi det ikke er mulig å simulere et naturlig system som det fremstår i virkeligheten. Naturen er for kompleks til å kunne fullt ut representeres numerisk. Modellen må imidlertid tilnærme seg nok av den hydrogeologiske kompleksiteten til at modellen kan reprodusere systemets oppførsel.

Det er flere steg ved oppbygging og implementering av den konseptuelle modellen i en numerisk modell:

- definere området av interesse;
- definere de hydrostratigrafiske enhetene;
- utforme en enkel vannbalansesanalyse, hvor fluksene defineres.

De viktigste grunnlagsdataene ved opprettelse av en grunnvannsmodell på Rena er listet opp i tabell 1.

Fysisk ramme	Referanser
Topografisk kart med bekker, innsjøer og elver	Figur 2
Geologisk kart og tverrprofiler som viser utstrekningen til modellen	Figur 4 + figurer 6, 7, 29-34 i rapport 2
Konturkart som viser grenseovergang mellom de ulike hydrostratigrafiske enheter	Figur 8, 9 og 10
Konturkart som viser utstrekningen og dybden til Glomma og Prestsjøen	Figur 8
Hydrogeologisk ramme	
Tabell og konturkart med grunnvannsstand (m o.h.)	Se kapittel 2.3 og figur 43 (begge i rapport 2)
Kurver som viser endringer i grunn- og vannstand over tid	Se kapittel 2.3 og figur 42 i rapport 2
Verdier for hydraulisk konduktivitet i de ulike avsetningene	Se kapittel 2.2 i rapport 2
Estimering av fordamping, effektiv nedbør, grunnvannsdannelse, naturlig utstrømning av grunnvann, mengder av grunnvannsuttak	Se kapittel 1.3.6 i rapport 2

Tabell 1. Viktige grunnlagsdata ved opprettelse av grunnvannsmodellen for Rena.

2.1. Modellområdet

Det første steget ved utforming av en konseptuell modell er å definere modellområdet. Det er i utgangspunktet viktig å velge naturlige hydrogeologiske grenser for å definere modellområdet. Med naturlige hydrogeologiske grenser menes:

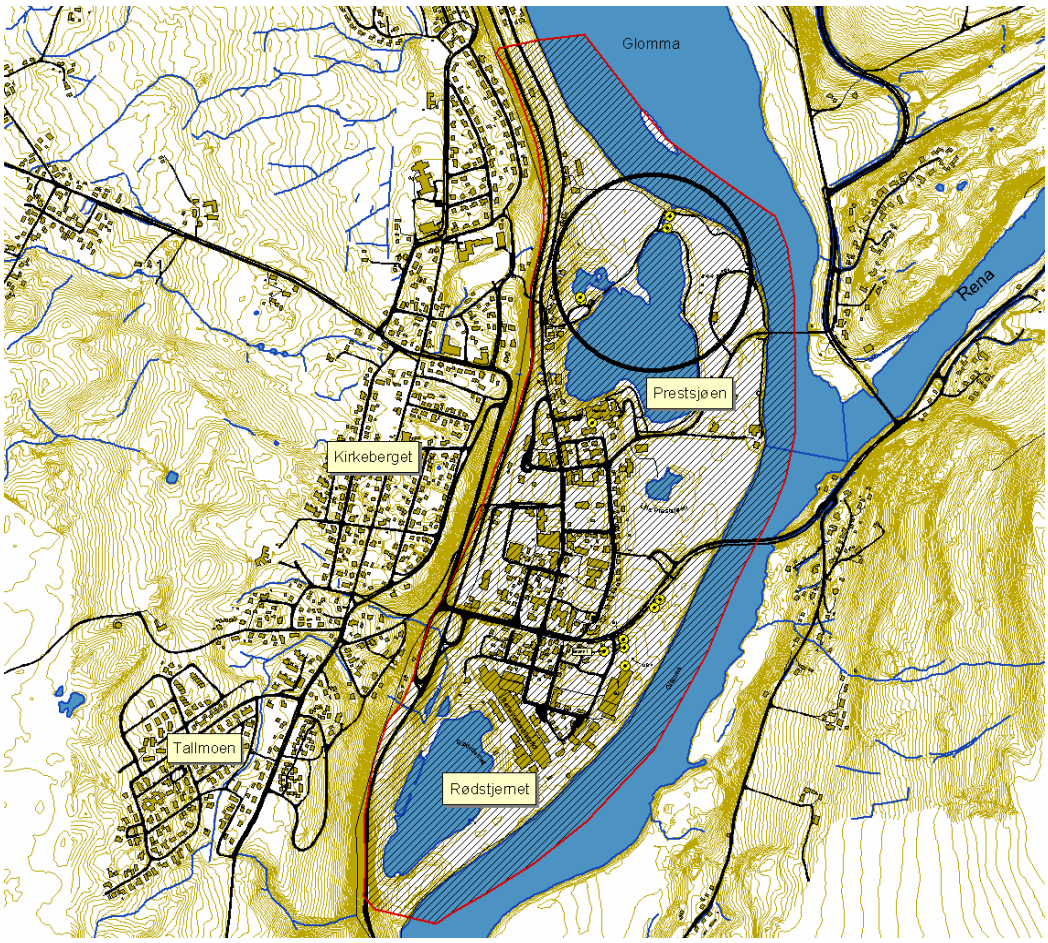
- grenser til overflatevann (elv, innsjøer, myrområder…);
- geohydrologiske (fjell/kantene til akviferen, hovedsprekker..);
- grunnvannsskiller.

Det er ikke alltid mulig å definere grenser vha. naturlige hydrogeologiske grenser fordi det også er viktig å begrense det modellerte området til det minste mulige arealet/volumet mht. programmets beregningskapasitet og ønskede oppløsning av resultatene.

Ved Rena er det flere kriterier som tas i betraktning ved definering av de ytre grensene til modellområdet:

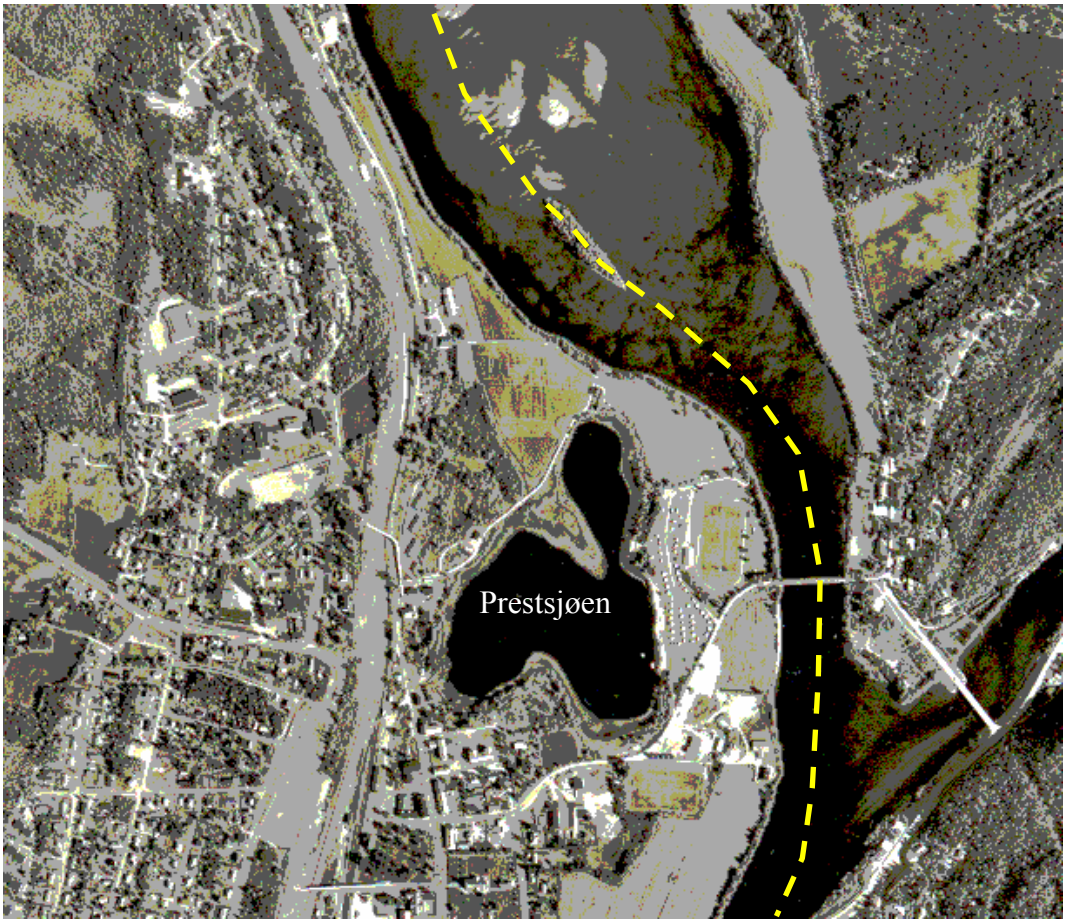
- grunnvannsforekomstens utbredelse;
- naturlige hydrologiske grenser: elv, bekker, fjell;
- avrenningsområdene til elvesletta;
- kildeutspring;
- fjellbløtning;
- iskontaktskråning/terrassekant;
- grunnvannsuttak og potensielle forurensingskilder.

En beskrivelse av grunnvannsforekomsten i Rena sentrum er gitt i rapport 2. Sirkelen i figur 2 viser området som var av primærinteresse. Den tilsvarer området rundt de gamle kommunale grunnvannsanleggene (se kapitlene 1.2.3 og 1.4 i rapport 2). Dette området er ikke avgrenset av naturlige hydrogeologiske skiller. For å kunne studere interaksjon mellom grunnvann og overflatevann, effekt av reguleringer og andre menneskelige inngrep er det derfor nødvendig å utvide modellområdet. Glomma omgir Rena sentrum på tre kanter og utgjør på denne måten en naturlig grense for en modell som dekker hele elvesletta i Rena. Grensene sør for Rødstjernet og nord for Prestegård tilsvarer grensene for avrenningsområdene til elvesletta (se figur 5 i denne rapporten og kapittel 1.1 i rapport 2).



Figur 2. Topografisk kart over Rena. Modellområdet er skravert. Sirkelen indikerer det området som i utgangspunktet var av interesse og er mest undersøkt (reservekilden).

På vestsiden har vi valgt den vestlige kanten av elvesletta, dvs. hvor elvesletta møter fjellveggen, som grense. Denne grensen er lett å identifisere der fjellet opptrer i dagen (fjellbløtning: se figur 29 i rapport 2), langs veien vest for Rødstjernet, eller langs jernbanelinjen nord for Prestegården. Platået på vestsida av Rena sentrum (Tallmoen og Kirkeberget) som ligger mellom 240 og 280 m.o.h. består av fjell dekket av et tynt lag av morenematerialer (0-10 m ifølge informasjon som ligger i kvartærkart og NGUs brønnboringsdatabase). Da det foregikk vegarbeid rett sør for Rena sentrum våren 2002, var det mulig å observere at det lokalt ligger 2-5 m grove materialer (blokker, steiner og grusig sand) direkte over fjellet. Et annet kriterium ved avgrensing av det vestre området er forekomsten av kildeutspring langs denne grensen. Det er et kildeutspring registrert i kvartærkart vest for Rødstjernet på ca. 230 m.o.h. (se figur 7 i rapport 2) og flere øst for Hovdmoen, noen kilometer nord for Rena sentrum (Rohr-Torp, 1991). Det er derfor valgt å bruke kotehøyde 230 m.o.h. for å avgrense modellen på den vestre siden.



Figur 3. Flybilde over elvesletta, Glomma og Prestsjøen (Fjellanger Widerøe AS 27.07.1990). Bildet er behandlet slik at man ser forskjell på områder i Glomma som er grunne og dype (ulike sedimentasjonsforhold). Den stiplede kurven viser modellens østre grense.

Analysen av flybildene tatt sommeren 1990, og resultater fra georadarundersøkelsene, viser at det ligger en kanal med større dybder både langs den vestre og østre siden av Glomma (figur 3). Større dybde er kjennetegnet av større vannføring, erosjon og dermed god hydraulisk kontakt med akviferen. Det er derfor bestemt å bruke midtpunktet i Glomma som grense for modellen.

Det aktuelle området strekker seg fra veien sør for Rødstjernet til den nordre delen av Prestegårdsjordene, og er avgrenset på vestsiden av dalsiden ved kotehøyden 230 m.o.h. Med denne definisjonen har det aktuelle området et totalt areal på ca. 1.5 km^2, en maksimumslengde på ca. 2 km fra sør til nord og en maksimumsbredde fra vest til øst på ca. 800 m.

2.2. Hydrostratigrafiske enheter

I kapittel 2 i rapport 2 er informasjon om grunnvannsforekomstens struktur og sammensetning sammenstilt. Ut fra denne informasjonen har vi forsøkt å definere de hydrostratigrafiske enhetene til den konseptuelle modellen. Med hydrostratigrafiske enheter menes enheter som består av relativt homogene materialer med liknende hydrogeologiske egenskaper. Bestemmelsen av hydrostratigrafiske enheter utføres på grunnlag av resultatene fra georadarundersøkelser, sonderboringer og analyser av kornstørrelsesfordeling. Informasjon om og forståelse av kvartær historie er også et viktig grunnlag ved bestemmelse av disse enheter (se kapittel 1.2). Området består av 4 følgende hovedgrupper:

Fluviale avsetninger (sortert materiale):

- Nedre terrasseflate med tidligere flomløp (siltig sand);
- Bunnsedimenter i Glomma/Prestsjøen (siltig sand).

Glasifluviale avsetninger (sortert materiale):

- Øvre terrasse: smeltevannsavsetninger: grusig stein;
- Terrasse Rena sentrum: grus;
- Grusig sand med rullestein (esker).

Morenematerialer (dårlig sortert materiale):

- siltholdig bunnmorene (avsatt ved bunnen av breen);
- ablasjonsmorene/smeltemorene.

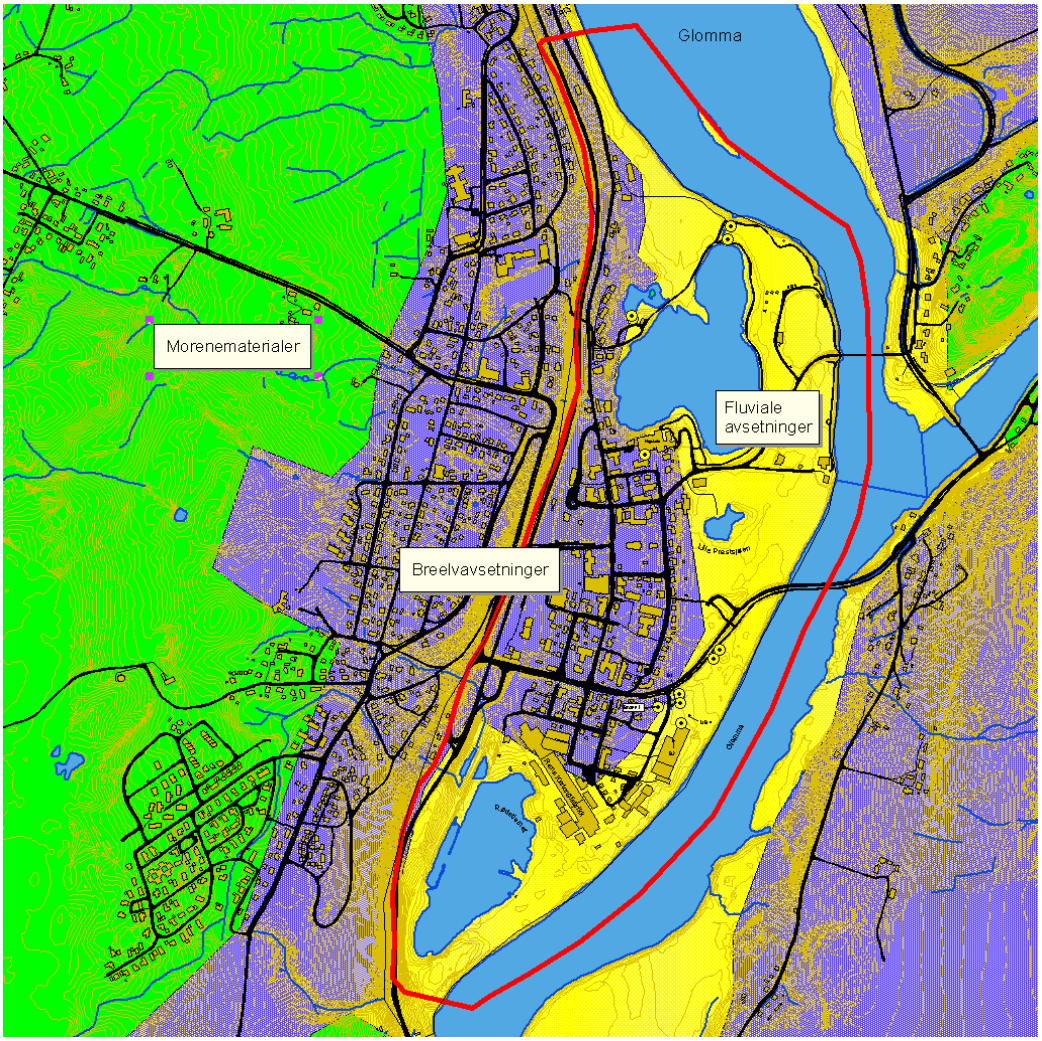
Fjell

De to siste gruppene (morene og fjell) er forholdsvis tette (se rapport 2). Vi antar derfor at de ikke har noen direkte effekt på strømningsforholdene og interaksjonen mellom grunnvann og overflatevann. I vår modell kan vi dermed se bort fra disse to grupper. Gruppe 1 og 2 utgjør de 2 viktigste lagene i modellen. Første lag i Modflow tilsvarer overflatevann (Glomma, Prestsjøen og Rødstjernet).

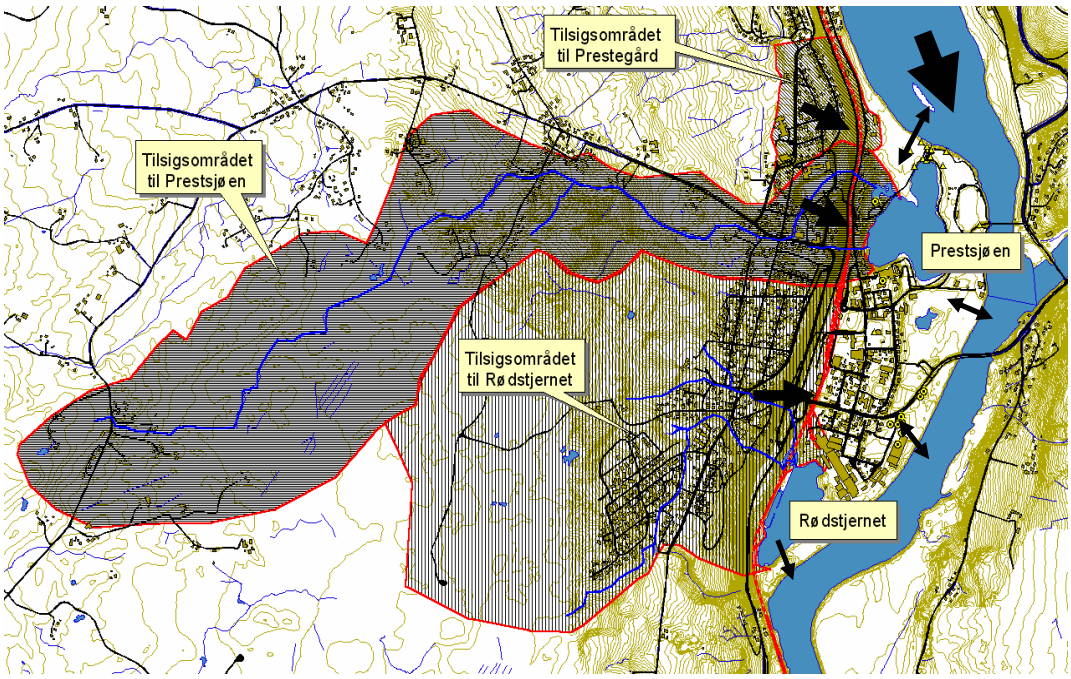
Tabell 2 viser hovedtrekk til de hydrostratigrafiske enhetene i modellen, mens figur 4 viser utstrekningen av disse enhetene på overflaten (Kvartærgeologisk kart). Den konseptuelle modellen for Rena er bygd opp på grunnlag av disse hydrostratigrafiske enhetene (tabell 2), og av de ulike vannbalanseelementene (figur 5). Figur 6 viser hvordan den konseptuelle modellen kan implementeres numerisk i 3 lag, med infiltrasjon fra platået, terrengoverflaten og Glomma.

Materialtype	Jordarter	Modell-lag
Overflatevann	-	**1** Virtuelt lag
Fluviale avsetninger (Nedre terrasse)	Siltig sand (sortert)	**2**
Glasifluviale avsetninger (Øvre terrasse)	Grusig sand (godt sortert)	**3**

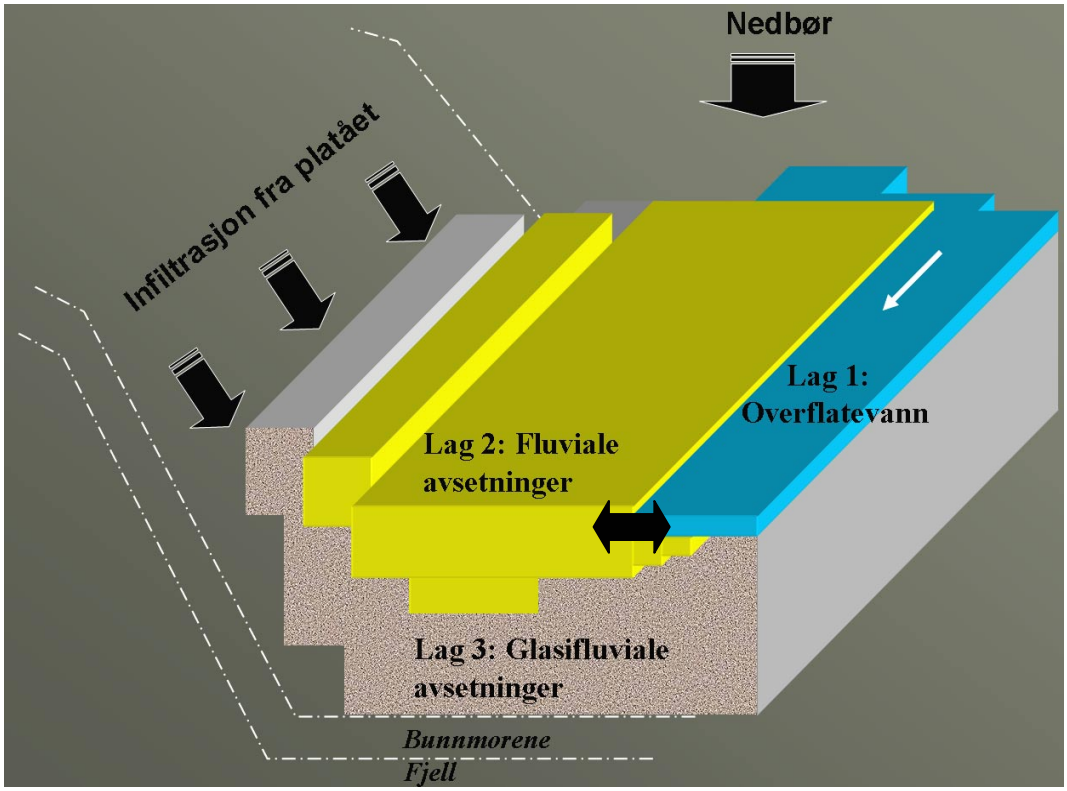
Tabell 2. Hovedtrekk til de hydrostratigrafiske enhetene i grunnvannsmodellen.



Figur 4. Forenklet kvartærgeologisk kart over Rena.



Figur 5. Elveslettas tilsigsområder. Pilene indikerer hovedretningen til antatte vannbevegelser.



Figur 6. Skisse over implementeringen av den konseptuelle modellen i 3 lag, med infiltrasjon fra platået, terrengoverflaten og Glomma.

2.3. Fysisk rammeverk og gridding

I en numerisk modell er interesseområdet presentert som celler oppdelt i et gridnett. For hver celle bestemmer modellen blant annet grunnvannshøyde og vannfluks. Størrelsen på cellene bestemmes av ønsket oppløsning på modellresultat og nøyaktighet av dette.

NVE har gjennom flomsonekart-prosjektet (se rapport 2) laget en digital terrengmodell som primært dekker Rena sentrum med en horisontal oppløsning på 5 meter (5*5 m) og en vertikal ekvidistanse på 1 m. Oppløsningen til denne modellen er bedre enn digitale data som foreligger i GIS-systemet vårt og brukes derfor som grunnlag. Modellen blir først avgrenset til det aktuelle området og aggregert for å oppnå den ønskede 10 meters cellestørrelse. Flomsonekartet dekker dessverre ikke hele området som vi er interessert i. Den vestre delen av den ønskede modellen mot platået mangler. Som grunnlag brukes derfor den digitale terrengmodellen tilgjengelig i GIS-systemet (1:50.000, ekvidistanse 5 m) for å utvide modellen. En ASCII fil som inneholder topografisk informasjon om de cellene er generert. Denne filen blir til slutt konvertert til et format (grid.fil) som Surfer og Modflow støtter.

Grunnvannsmodellen som bygges opp består av celler med fast størrelse (10*10 m), mens de triangulare cellene i Feflow har en variabel størrelse (figur 7). Det er mulig å bruke mindre celler på områder hvor det forventes store endringer i vannfluks (pumpebrønner, heterogene områder etc..).

Modellen består av de 3 følgende lagene:

- Avgrenset topografisk modell med bunnen til Glomma og innsjøer (figur 8);
- Nederste delen av glasifluviale sedimenter/øverste delen av hovedakvifer (figur 9);
- Nederste delen av hovedakvifer (den nedre grensen til modellen: figur 9).

Første trinn var å lage en begrenset grenseoverflate som dekker det aktuelle området og som inkluderer bunnen til Glomma og innsjøene i elvesletten. Dette utføres på grunnlag av den digitale terrengmodellen (GiS og Flomsonekart) og observasjoner av vanndyp i Prestsjøen og i Glomma (direkte målinger og estimert dyp ut fra georadarundersøkelser – se rapport 2). Oppgaven ble utført direkte i Arc/Info[1].

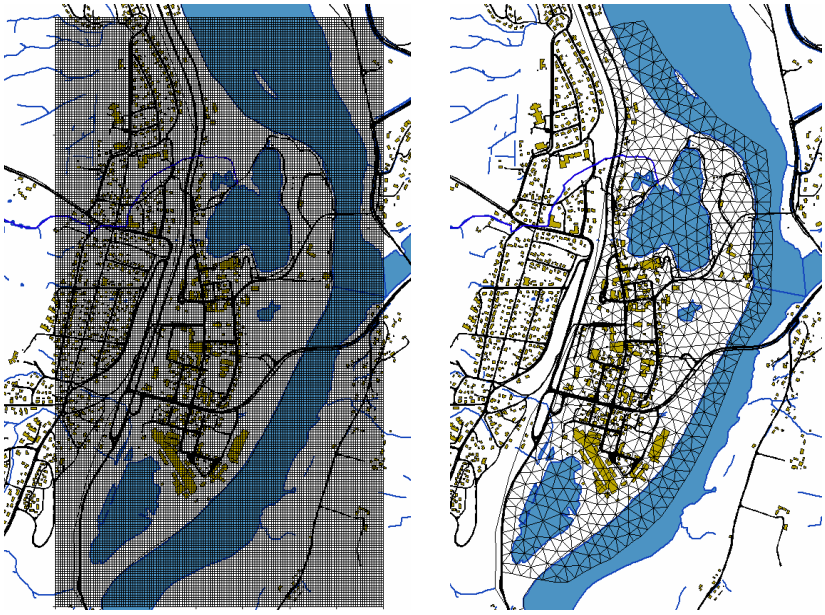
---

[1] Andre programmer som Surfer kan også anvendes for å utføre en slik oppgave. Man trekker først høydedata fra overflatevann og adderer interpolerte vanndypobservasjoner.

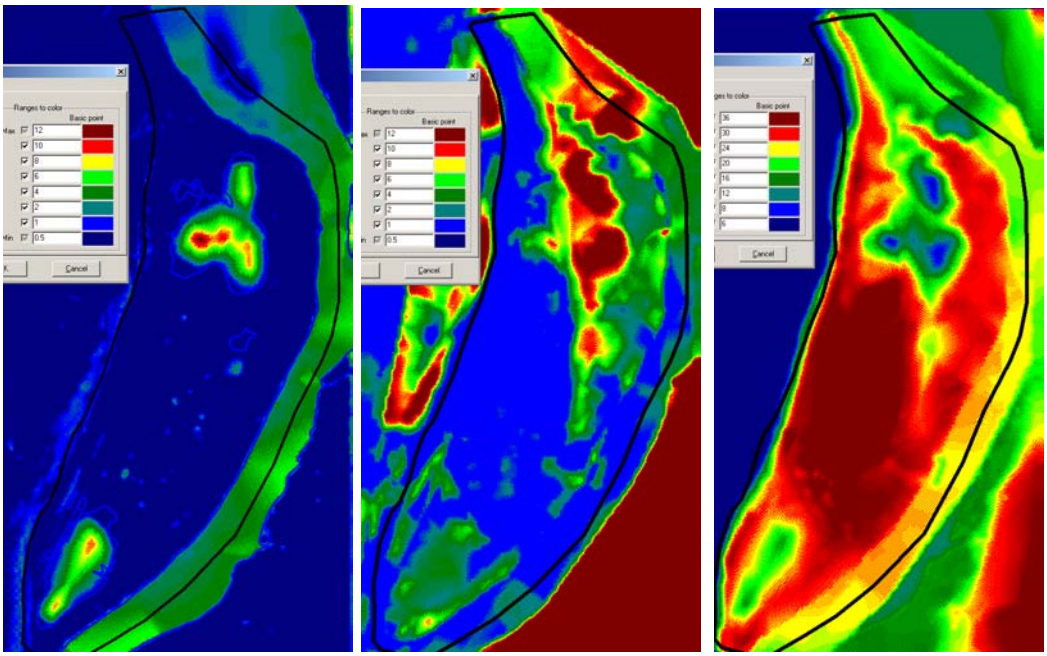
Den samme type oppgave utføres for å bygge de andre lagene som utgjør hele modellen. Overgangen mellom fluviale og glasifluviale sedimenter, og deretter til bunnmorene estimeres på grunnlag av resultater til georadarundersøkelser og sonderboringer (se rapport 2). Figur 8 viser mektigheten til lagene 1, 2, og 3 i modellen.

X min (NGO øst)	34 600
X maks (NGO øst)	36 000
Y min (NGO nord)	348 000
Y maks (NGO nord)	350 500
Antall rader	250
Antall kolonner	140
Antall lag	3
Antall celler (10×10 m)	105 000

Tabell 4. SK(NGO)-koordinater for de fire hjørnene på modellens gridnett.

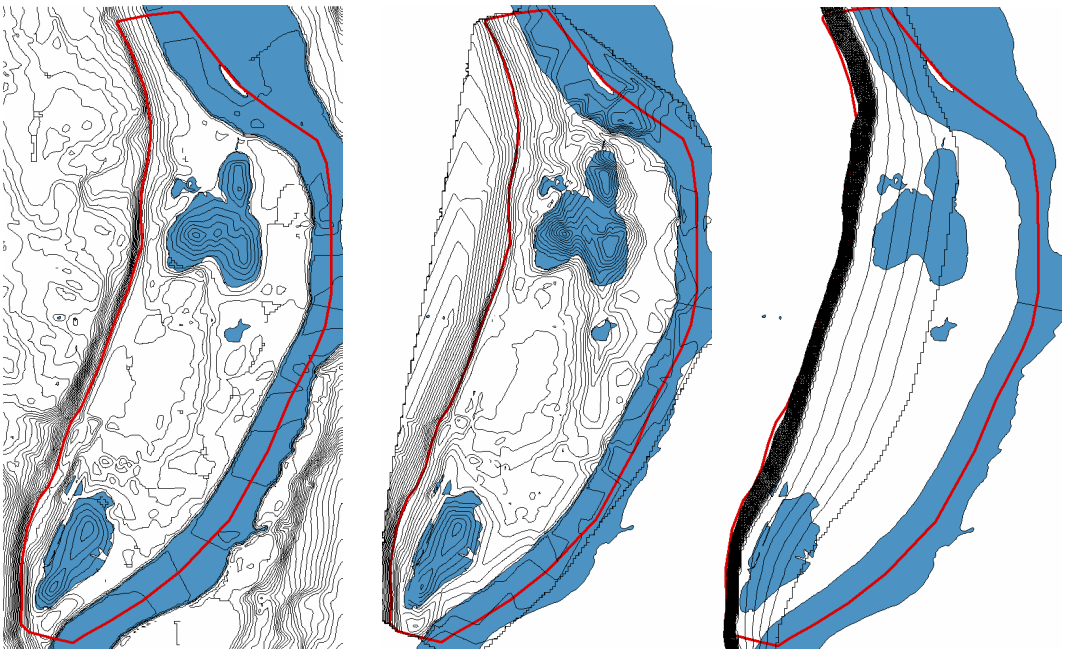


Figur 7. Gridnett over det modellerte området generert i Modflow (venstre) og i Feflow (høyre). Modellarbeid med Feflow er ikke beskrevet i denne rapporten.



a b c

Figur 8. Mektigheten til a: lag 1 (vanndyp); b: lag 2 (siltig sand), c: lag 3 (grusig sand). Vær oppmerksom på at fargene representerer ulike verdier (angitt i m).



a b c

Figur 9. a: Grenseoverflater mellom lag 1 og lag 2 (Fluviale sedimenter). b: Grenseoverflater mellom lag 2 og lag 3 (hovedakvifer). c: Det nederste nivået til hovedakviferen (grensen til bunnmorene). Ekvidistanse er 2 m for A-B, og 1 m for C.

2.4. Modellbetingelser

En grensebetingelse er en matematisk spesifisering av enten trykk eller fluks i modellen. Korrekt bestemmelse av betingelsene er en meget viktig del av oppbygningen av simuleringsmodeller, og kan være en av de viktigste årsakene til feil i datamodeller. Dette fordi modellen generelt er veldig følsom for grensebetingelser. I de tilfellene hvor tilstanden langs grenseflatene er usikker, bør det være stor avstand fra grenseflatene og inn til de områdene som er viktigst å simulere. I kapittel 2.1. gis begrunnelser for valg av modellområdet, og ytre grensebetingelser. Her forklares valg av type grensebetingelser.

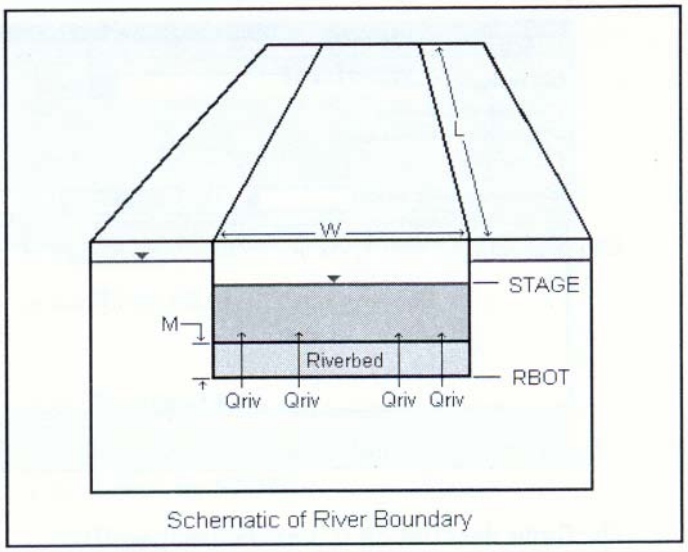
2.4.1. Glomma

Det er tre hovedmåter å simulere interaksjon mellom grunnvann og overflatevann i Modflow:

- Modulen ”River Boundary Conditions” simulerer interaksjon mellom overflatevann og grunnvann gjennom en lekkasje i laget som er grense mellom overflate- og grunnvannsforekomsten (se figur 10). Denne modulen krever for hver celle informasjon om elvevannstand, høyden til elvens bunn og strømningsmotstand (”conductance”) mellom grunnvannsforekomsten og elvevann. Strømningsmotstandsparameteren er en funksjon av hydraulisk ledningsevne og mektigheten til bunnsedimenter.
- Modulen ”Stream Boundary Conditions” simulerer også interaksjon mellom grunnvann og overflatevann, men her ved å bruke input-data om vannføring, vannstand, høyden til toppen og bunnen til bunnsedimenter, strømningsmotstand, gradient i elva og ruhetsgrad.
- Modulen ”Constant Head Boundary Conditions” er brukt til å legge konstant nivå i bestemte celler, dvs. med grensebetingelser hvor det tillates strømning både inn og ut, uten begrensning av mengden fluks.

”Stream” og ”River”-betingelsene er bedre tilpasset for å simulere interaksjon mellom elver og grunnvannet på en liten skala (flere km). I en regional modell representerer ofte en celle omtrent hele elveløp. Man har ofte lite kjennskap til egenskap og mektighet til bunnsedimenter, derfor bruker man strømningsmotstandsparameteren som en ukjent parameter, som også trenger kalibrering. På Rena, på grunnlag av georadarundersøkelser og sonderboringer, har vi kartlagt bunnsedimentene i Glomma. Slike bunnsedimenter er representert som et lag i modellen.

I modellen vår har vi derfor valgt å behandle Glomma som konstant trykk over laget som representerer bunnsedimentene. Trykket i cellene endrer seg over tid ved transiente simuleringer. Observert vannstand i Glomma og informasjon om gradient i Glomma (se kapittel 1.3.2 i rapport 2, og tabell 5 nedenfor) brukes som grunnlag for å fastsette trykket i cellene.

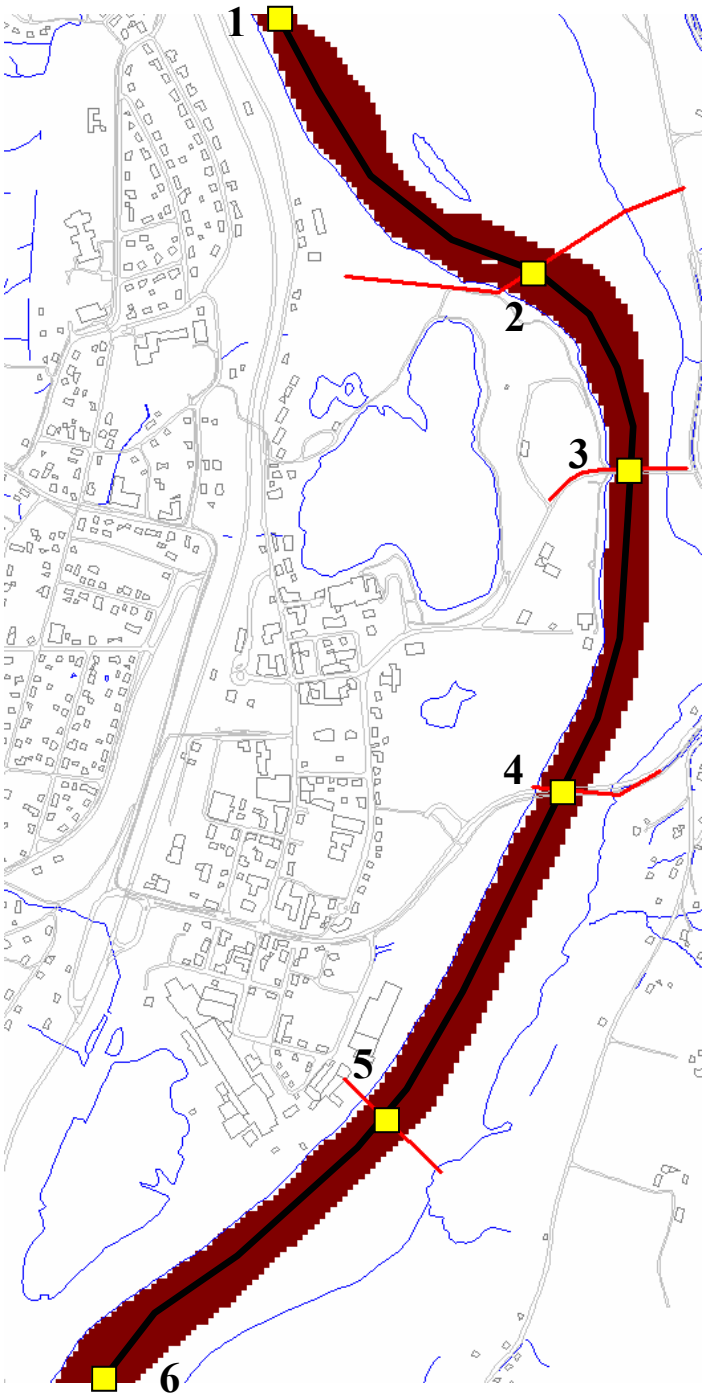


Figur 10. Skisse over "River"-betingelse (Visual Modflow Pro User's manual, Waterloo hydrogeologic).

	Gradient m	Vannstand 18.10.2002 m.o.h.
Fra øvre grense til profil 10	0.4	208.85-208.45
Fra profil 10 til profil 9	0.2	208.45-208.25
Fra profil 9 til profil 8	0.1	208.25-208.15
Fra profil 8 til nedre grense	0.07	208.15-208.08

Tabell 5. Gradient i Glomma brukt i grunnvannsmodellene (se kapittel 1.3.2, samt figur 13 og 14 i rapport 2)

Trykk i hver celle settes på grunnlag av informasjon gitt i tabell 5 og ved å anta en lineær relasjon mellom hver tverrprofil hvor elvevannstand i Glomma ble nivellert (se figur 11).



Figur 11. Punktene 2-5 indikerer lokalisering av steder hvor elvevannstand er nivellert (se figur 13 i rapport 2). Punktene 1 og 6 tilsvarer ytre grenser til modellen. Mellom punktene utføres en lineær interpolasjon (se linjen mellom punktene). Alle celler som ligger i samme rad er tillagt samme verdi som på den sentrale linjen.

2.4.2. Innsjøer

Prestsjøen og Rødstjernet er antatt å ikke være i direkte hydraulisk kontakt med akviferen, dvs. at vannet i innsjøene ikke bidrar til grunnvannsdannelse, samtidig med at innsjøene ikke er matet av grunnvannet. Dette ble drøftet tidligere i rapport 2 (se kapittel 2.3). Bunnene til innsjøer er sannsynligvis ikke helt tette, og man må regne med en viss utveksling av vann mellom akviferen og innsjøene, spesielt ved større grunnvannsuttak. Det ble derfor ved hjelp av modellen forsøkt å finne ut hvor tett bunnen til Prestsjøen kunne være. Vannstanden i Prestsjøen, utenom flom perioder, ligger ofte 2 m over grunnvannstand. Bruk av trykkbetingelser i form av ”River”-betingelser viser at bunnen til Prestsjøen må være veldig tett (vertikal komponent til hydraulisk ledningsevne < 10^{-6} m/s) for å oppnå resultater som nærmer seg observasjoner av både vannstand og strømningsforhold. Det er derfor valgt å se bort fra disse innsjøene i modellene våre.

2.4.3. Naturlig infiltrasjon gjennom terrengoverflaten og tilsig fra platået

Naturlig infiltrasjon gjennom terrengoverflaten ved nedbør og snøsmelting, samt tilsiget fra platået, simuleres med fluksbetingelser, de såkalte ”Recharge”- betingelser. Fluksen i disse cellene angis i mm/år og kan endre seg ved transiente simuleringer. Disse betingelsene kan kun legges i lag 1[2], siden denne type betingelse i utgangspunktet er ment å representere infiltrasjon fra terrengoverflaten. For å kunne legge fluksbetingelser i lag 3 må alle de tilsvarende cellene i lag 1 og 2 være satt som inaktive.

Asfalterte områder/tettsteder i Rena sentrum håndteres som tette med en infiltrasjon fra overflate (grunnvannsdannelse) lik null. Dette har lite effekt på resultatene av simuleringer.

Vi har tidligere prøvd å estimere (se kapittel 1.1.5 i rapport 2), på grunnlag av nedbør og fordampingsstatistikk, fornyelse av grunnvannet. Den totale mengden av vann som fornyes direkte fra overflate er liten i forhold til det totale tilsiget fra platået, og det er derfor ikke noe problem å anta samme ”effektive nedbør” på platået som på elvesletta.

Sommerforhold med høy evapotranspirasjon, eller vinterforhold med snø og tele i jord kan kraftig redusere fornyelsen av grunnvann, likevel vil tilsig fra platået holde en relativt lav jevn størrelse som er en funksjon bl.a. av akviferens hydrauliske ledningsevne. Det er dette grunnvannstilsiget som sørger for at vannføringen i bekkene/elvene opprettholdes. Vi antar at i gjennomsnitt vil rundt 30 til 50 % av nedbøren (200 til 400 mm/år) kunne mate elvesletta på Rena.

---

[2] I Visual Modflow versjon 3.1 er dette problemet løst, slik at man kan sette fluksbetingelser hvor som helst i modellen.

Denne størrelsen er veldig usikker pga. sesongvariasjoner og menneskelige inngrep (gravde brønner, grøfter, asfalterte områder etc..). Vi skal derfor bruke grunnvannsmodellen til å hjelpe oss å fastsette en verdi for grunnvannstilsig fra platået. Kalibreringsprosedyren som baseres på grunnvannstandsobservasjoner og målinger av miljøindikator (se kapittel 2.3.3. i rapport 2) blir beskrevet senere i denne rapporten.

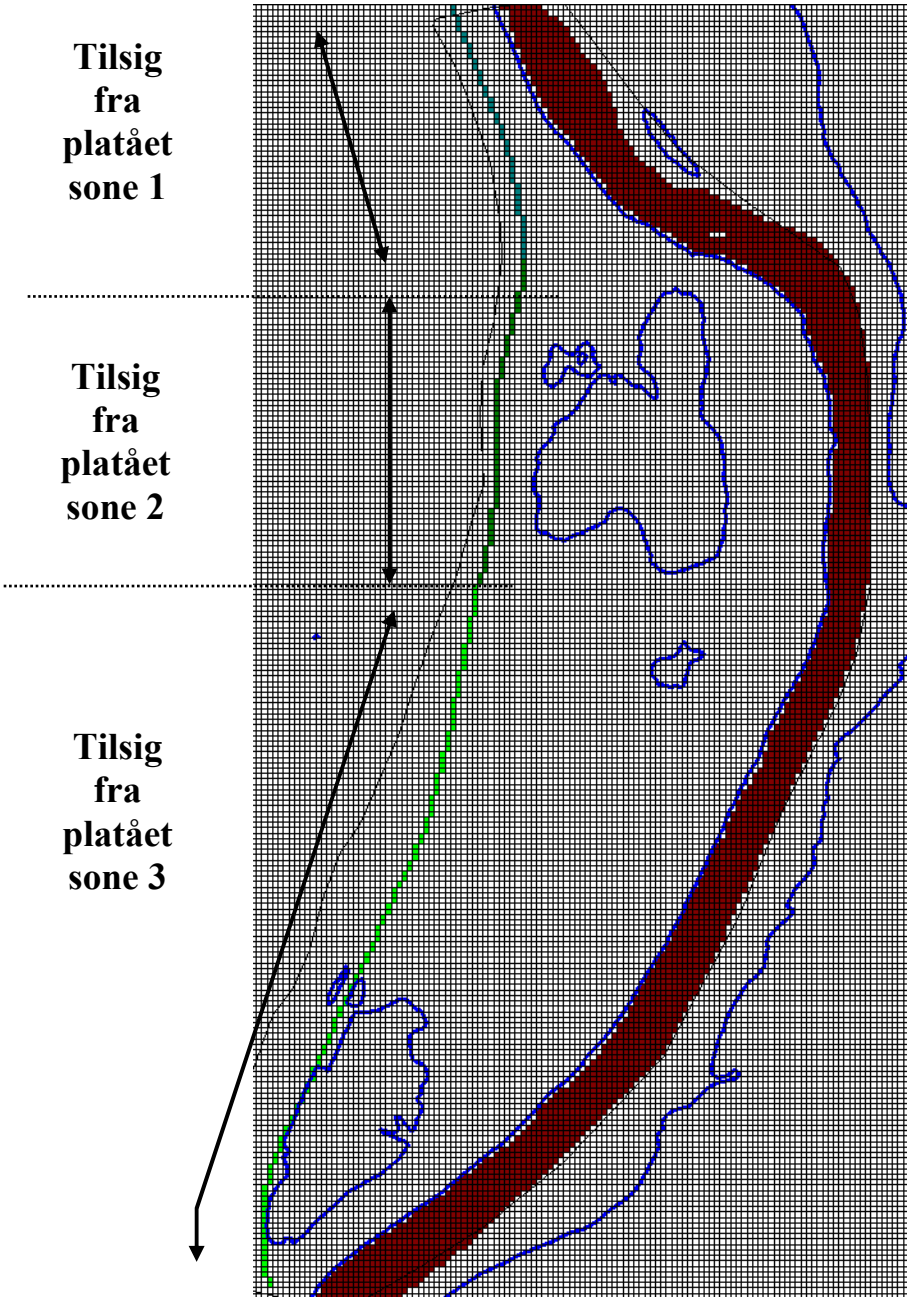
	Tilsigsområde til	Areal m^2	Antall celler (10×10 m)	Totalt areal av cellene i m^2	Forhold mellom areal til tilsigsområde og cellene
Sone 1	Prestegård	$0.21\ 10^6$	50	5 000	42
Sone 2	Prestsjøen	$2.63\ 10^6$	60	6 000	438
Sone 3	Rødstjernet	$2.44\ 10^6$	130	130 000	188

Tabell 6. Prinsipp for å fastsette fluksen i cellene for hver sone (se figur 5 og 12).

Grunnvannstilsig fra platået simuleres ved å legge inn fluksbetingelser (”Recharge”) i celler langs jernbanelinjen (se kapittel 2.1 i denne rapporten). Fluksbetingelser angis i Modflow i mm/år. Grunnvannstilsig fra ”Prestegårdsnedbørfeltet” (se figur 5) er simulert ved hjelp av 50 celler. Siden hver celle har et areal på 100 m^2, representerer totalt areal for cellene 5 000 m^2. Tilsigsområdet til Prestegård er antatt å være rundt $0.21\ 10^6\ m^2$. Dette arealet er 42 ganger større enn arealet til de aktuelle cellene som er representert i modellen (tabell 6). Tilsiget til hver celle justeres derfor ved å multiplisere det antatte grunnvannstilsiget (”effektiv nedbør”) med 42. Det gjøres det samme i sone 2 og 3 ved å bruke en multiplikatorfaktor på henholdsvis 438 og 188 (tabell 7).

	Multiplikatorfaktor	Tilsig angitt i mm/år for hver celle
Sone 1	42	12 600
Sone 2	438	131 400
Sone 3	188	56 400

Tabell 7. Estimert tilsig for hver fluksbetingelse ved en ”effektiv nedbør” på 300 mm/år.



Figur 12. Grensebetingelser i Modflow-grunnvannsmodellen. Glomma er simulert ved hjelp av konstant trykkbetingelse, mens tilsiget fra platået er simulert ved hjelp av fluksbetingelse. Grunnvannstilsiget fra platået er delt inn i 3 soner for å representere elveslettas tre ulike tilsigsområder (se figur 5).

3. Kalibrering og verifisering

Grunnvannsmodellen er kalibrert med transiente simuleringer for en periode på 216 dager i 2002. Perioden representerer godt et normalt år med snøsmelting, vårflom, samt sommer og vinterforhold med lavvannføring. Kalibrering er utført delvis automatisk med Pest ved bruk av 6 justerbare parametere (hydraulisk ledningsevne, magasinkoeffisient og spesifikke ytelser) for de to lagene som utgjør akviferen. Grunnvannstilsigsmengde fra platået er justert i modellen slik at vannutvekslingsmønsteret er i tråd med målinger av miljøindikator (vanntemperatur og elektrisk ledningsevne) målt under bunnsedimentene til Glomma. Det er også utført en verifisering av modellen ved å kjøre modellen for en periode på 123 dager i 1999. Resultatene av både kalibrering og verifisering ansees som tilfredsstillende for å utføre analyser av vannutvekslingsmengder mellom grunnvannsmagasinet og Glomma.

3.1 Kalibrering

Grunnvannsmodellen er kalibrert med transiente simuleringer for en periode fra 01.02.2002 til 07.09.2002. Simuleringer kjøres med døgndata (216 dager) ved bruk av gjennomsnittsverdier for vannstand i Glomma. Modellen er kalibrert mot 316 observasjoner. Figur 13 viser et oversiktskart over alle observasjonsbrønner som anvendes ved kalibreringen av modellen.

Den største delen av observasjonene er utført i rør 8 (daglige observasjoner), mens 100 andre er manuelle observasjoner utført i 15 ulike observasjonsbrønner (tabell 8). Det brukes i tillegg observasjoner som ble utført tidligere på en kvalitativ måte: brønnen ved Høyskolen (U2) var f. eks. i 2002 ikke tilgjengelig for observasjoner, og rør NGU2 var tomt ved de fleste observasjonstidspunkter (figur 15). Beliggenheten til og beskrivelsen av alle observasjonsbrønner er presentert tidligere i kapittel 1.4.5 i rapport 2. De fleste observasjoner ligger i den nordligste delen av elvesletta nord for Prestsjøen. Spredningen av observasjoner er dårlig mht til kontroll av strømningsforhold i Rena sentrum og den sørligste delen av elvesletta.

Figur 13. Oversiktskart over tilgjengelige observasjonsbrønner i Rena. P1 indikerer lokalisering av pumpebrønnen P1. En bedre oversikt er gitt i rapport 2.

	20.02	18.04	10.05	24.05	14.06	10.07	11.07	31.07	05.09	Totalt
H3B			1		1	1	1		1	5
NGU1		1	1	1	1	1	1	1	1	8
NGU2			1	1						2
NVE2		1	1	1	1	1	1	1		7
NVE3			1	1	1	1	1	1	1	7
NVE5		1	1	1	1	1	1	1	1	8
NVE6		1	1	1	1	1	1	1	1	8
R1		1	1		1	1		1	1	6
R2		1	1		1	1		1	1	6
R3		1	1	1	1	1		1	1	7
R4		1	1	1	1	1	1	1	1	8
R5		1		1	1	1	1	1	1	7
R7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
UB2		1	1		1	1	1		1	6
UB3		1	1		1	1	1		1	6
Totalt	1	12	14	10	14	14	11	11	13	100

Tabell 8. Antall manuelle observasjoner brukt ved kalibrering av modellen. I tillegg brukes daglige målinger i rør 8 (logger).

Parametrene som styrer modellen er følgende:

- Effektiv nedbør (infiltrasjon fra terrengoverflate og tilsig fra platået). Det er antatt at grunnvannstilsigsmengde er en funksjon av månedlig effektiv nedbør. Tilsigsmengde angis som fluksbetingelser. Effektiv nedbør som brukes for å fastsette tilsig fra platået og fornyelse av grunnvann gjennom terrengoverflaten er noe som er lite kjent og som kan justeres;
- Elvevannsnivå. Elvevannsnivå i Glomma regnes som noe kjent og er derfor ikke blant parametrene som kan justeres.
- Hydraulisk ledningsevne (K) i lag 2 og 3, som er et mål for avsetningens evne til å slippe gjennom vann. Heterogeneiter inni glasifluviale avsetninger gjør at hydraulisk ledningsevne må betraktes som anisotropisk. Den vertikale hydrauliske ledningsevne er i slike avsetninger vanligvis mye mindre enn den horisontale hydrauliske ledningsevnen, dette pga av foretruket orientering av partikler som ble avsatt (lagdeling). Anisotropigraden for grove materialer er på ca. 10, derfor har vi satt Kz lik Kx/10;

- Storativitet og spesifikk ytelse i lag 2 og 3. Storativiteten (Specific storage, Ss), også kalt magasin-koeffisienten, er, i en lukket akvifer, et mål for hvor mye vannet i det vannførende laget lagres eller frigjøres som følge av endringer i grunnvannstrykket[3].

Den spesifikke ytelsen (Specific yield, Sy) tilsvarer, i åpen akvifer, den effektive porøsiteten.

Kalibrering utføres for å finne et parametersett som best reproduserer observasjoner. Pga. mange parametre er løsningen ikke unik. For å redusere antall løsninger har vi valgt å begrense antall parametre, og variasjonsbredden til disse parameterne. Maksimums- og minimumsverdier, angitt i tabell 9, er bestemt på grunnlag av tidligere undersøkelser (se rapport 2).

	Transformasjon	Initial verdi m/s	Laveste verdi m/s	Maksimum verdi m/s
Kx_2	**log**	**$3\ 10^{-5}$**	**$1\ 10^{-7}$**	**$1\ 10^{-4}$**
Ky_2	$= Ky_2$	$3\ 10^{-5}$	$1\ 10^{-7}$	$1\ 10^{-4}$
Kz_2	$= Kx_2/10$	$3\ 10^{-6}$	$1\ 10^{-8}$	$1\ 10^{-5}$
Kx_3	**log**	**$8\ 10^{-3}$**	**$1\ 10^{-4}$**	**$1\ 10^{-1}$**
Ky_3	$= Ky_3$	$8\ 10^{-3}$	$1\ 10^{-4}$	$1\ 10^{-1}$
Kz_3	$= Kx_3/10$	$8\ 10^{-4}$	$1\ 10^{-5}$	$1\ 10^{-1}$
Ss_2	**log**	**$5\ 10^{-5}$**	**$1\ 10^{-7}$**	**$1\ 10^{-3}$**
Ss_3	**log**	**$4\ 10^{-4}$**	**$1\ 10^{-5}$**	**$1\ 10^{-1}$**
Sy_2	**log**	**$4\ 10^{-4}$**	**$1\ 10^{-7}$**	**$1\ 10^{-1}$**
Sy_3	**log**	**$4\ 10^{-2}$**	**$1\ 10^{-5}$**	**$5\ 10^{-1}$**

Tabell 9. Parametersetting i WinPest ved kalibreringsforsøk. Justerbare parametre er uthevet.

[3] Høye verdier av Ss og S_y gir rask endring i grunnvannsstand, dvs. at variasjoner i grunnvannsnivåer følger i takt med variasjoner i elvevannstand (tilnærmet stasjonær ("steady state") simulering).

3.1.1. Kalibreringsstrategien

Vi har to uavhengige typer observasjoner i Rena for å kunne kalibrere grunnvannsmodellen:

- observasjoner av grunnvannsnivå i ulike brønner;

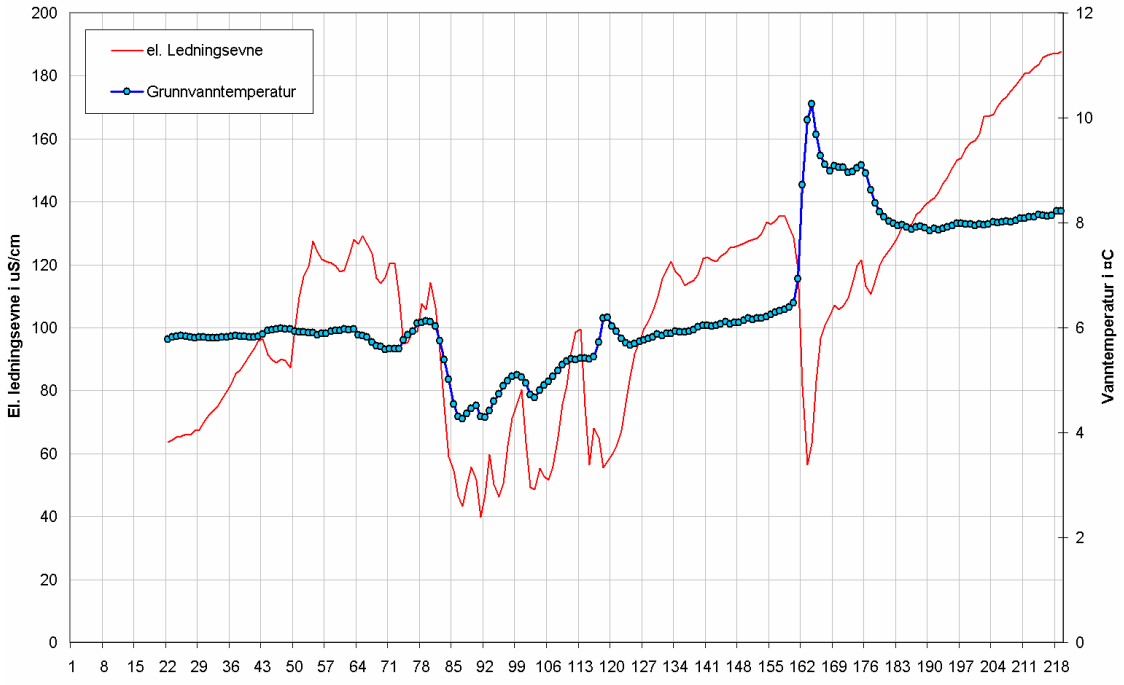
- observasjoner av miljøindikatorer i grunnvannet (under bunnsedimentene til Glomma) og Glomma (vanntemperatur og elektrisk ledningsevne) som gir kvalitative indikasjoner på vannutveksling mellom grunnvannsmagasinet og Glomma (se rapport 2).

Manuelle forsøk på kalibrering har vist at endring i tilsigsmengden fra platået har veldig liten effekt på grunnvannsnivåene, men derimot relativt stor betydning for vannbalanse inni modellen. For å redusere tidsforbruk ved kjøring av automatisk kalibrering (kan vare flere dager) og problemet med ”ikke unik løsning”, har vi begrenset oss til 6 justerbare parametre.

Kalibreringsstrategien består av to trinn:

1. Finne et parametersett for avsetningsegenskaper slik at estimerte grunnvannsnivåer stemmer med observasjoner. Dette utføres automatisk ved bruk av WinPest med 6 justerbare parametre (se tabell 9);

2. Justere effektiv nedbør (grunnvannstilsig fra platået) slik at man oppnår en vannbalanse som er i tråd med observasjoner av miljøindikatorer (figur 14).



Figur 14. Miljøindikator (elektrisk ledningsevne og vanntemperatur) målt under bunnsedimentene til Glomma i simuleringsperioden (se rapport 2 for kommentarer).

3.1.2. Automatisk kalibrering

Kalibreringen ble utført automatisk med WinPest. Kjøringen tok litt over et døgn (for en Pentium III 1200MHZ og 256 MB Ram). Resultatene er vist i tabell 10 og 11.

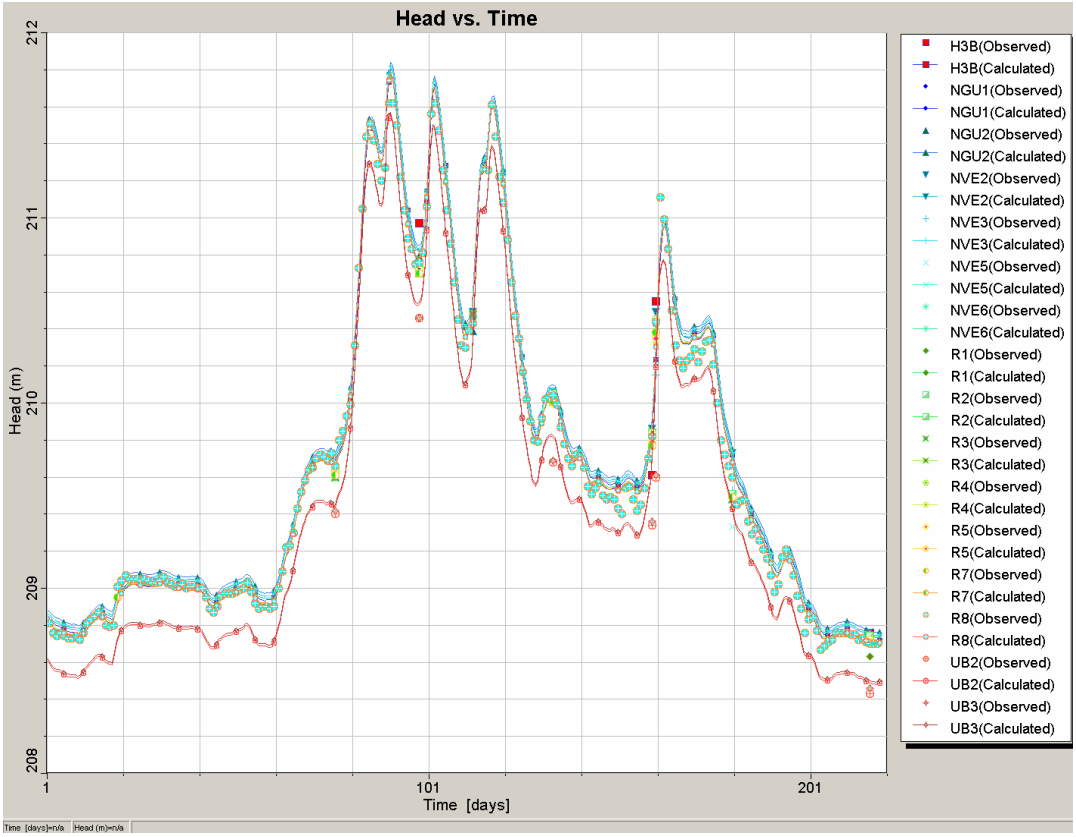
	Estimert verdi m/s	95 % konfidensgrense Laveste verdi m/s	95 % konfidensgrense Maksimum verdi m/s
Kx_2	$5.7\ 10^{-5}$	$3.8\ 10^{-5}$	$8.4\ 10^{-5}$
Kx_3	$9.8\ 10^{-3}$	$7.2\ 10^{-3}$	$1.3\ 10^{-2}$
Ss_2	$5.6\ 10^{-5}$	$9.9\ 10^{-7}$	$3.2\ 10^{-3}$
Ss_3	$4.7\ 10^{-4}$	$6.9\ 10^{-6}$	$3.2\ 10^{-2}$
Sy_2	$3.9\ 10^{-4}$	$3.9\ 10^{-4}$	$4.0\ 10^{-4}$
Sy_3	$8.7\ 10^{-2}$	$4.5\ 10^{-2}$	$1.7\ 10^{-1}$

Tabell 10. Resultat fra WinPest. Konfidensgrensene gir en indikasjon på parametrenes usikkerhet.

Tabell 11, figur 15 og 16 gir informasjon om hvor god kalibreringen er.

Number of adjustable parameters	6	Kx_1, Kx_2, Ss_1, Ss_2, Sy_1, Sy_2
Number of observations	316	219 dager, daglige observasjoner i rør 8 + 100 manuelle observasjoner utført i 15 ulike observasjonsbrønner,
Sum of squared weighted residuals (RMS)	3.2 %	Mellom estimerte verdier og observerte verdier
Correlation coefficient	0.9925	Mellom estimerte verdier og observerte verdier
Mean value of non-zero weighted residuals	-0.012 m	
Maximum weighted residual	0.34 m	Observasjonspunkt R8 Observ: 211.11 Calc: 210.77
Minimum weighted residual	-0.68 m	Observasjonspunkt UB3 Observ: 209.60 Calc: 210.28
Standard variance of weighted residuals	$1\ 10^{-3}$ m	
Standard error of weighted residuals	0.10 m	

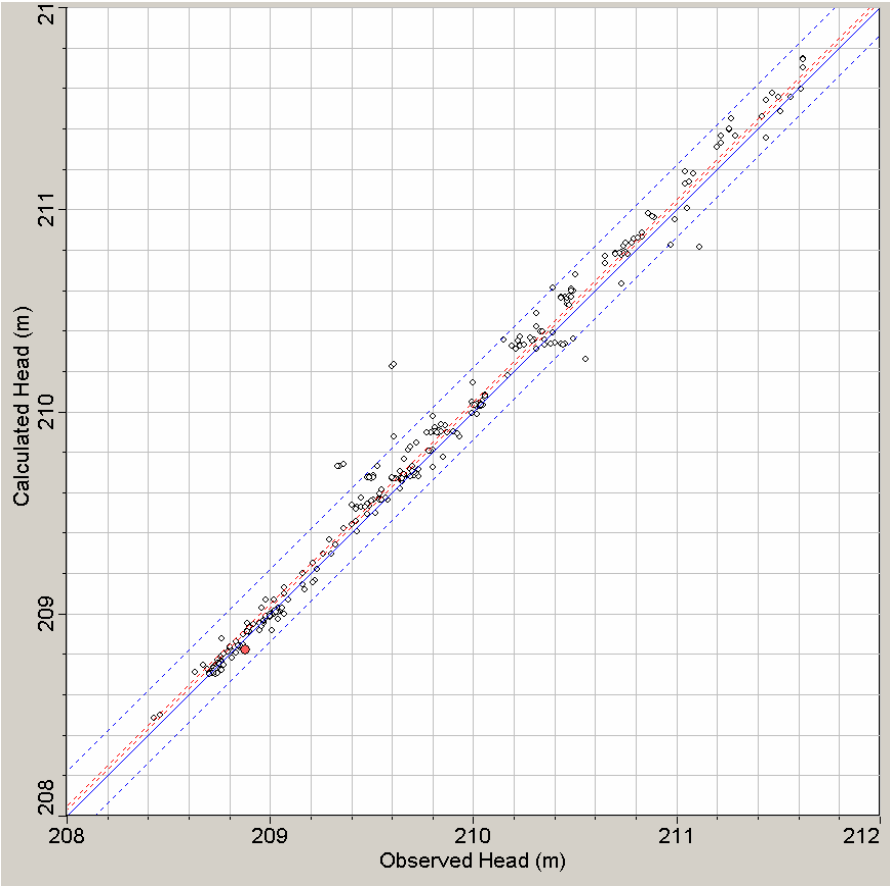
Tabell 11. Informasjon om resultater fra kalibrering med WinPest.



Figur 15. Observerte (punkter) og simulerte grunnvannsnivåer (kurver) i perioden fra 01.02.2002 til 07.09.2002.

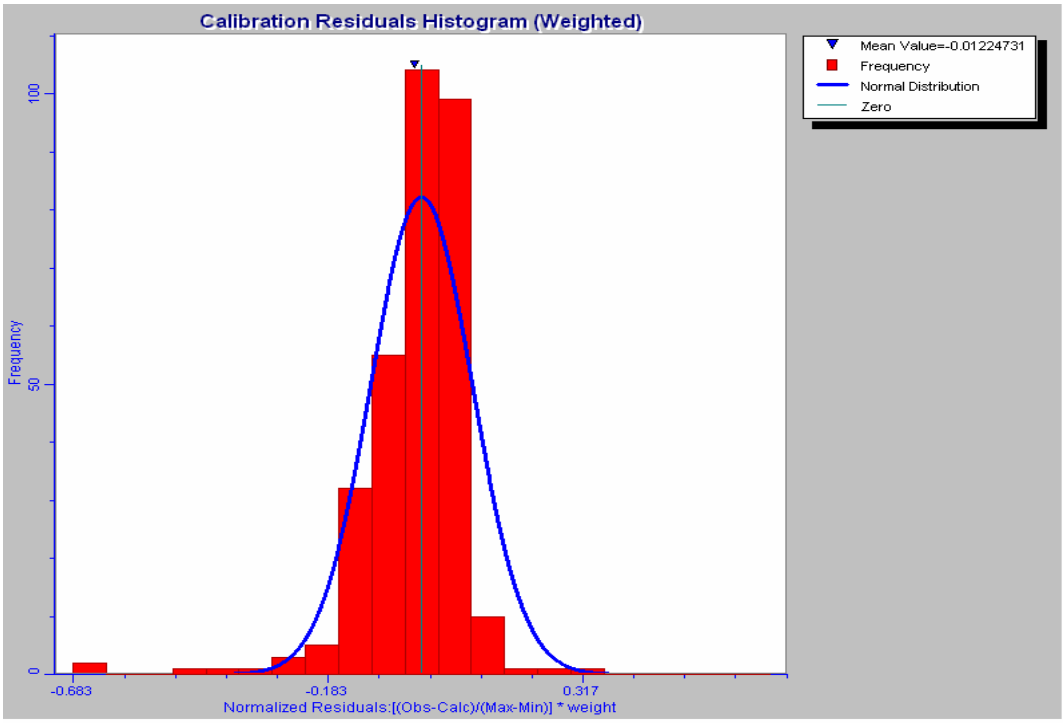
For å sjekke hvor god simuleringen er blir estimerte grunnvannsnivåer sammenlignet med observerte nivåer (figur 15). Figur 16 viser estimerte grunnvannsnivåer vs. observerte grunnvannsnivåer. Punktene ligger langs en rett linje som skjærer i origo med stigningstall 1. Korrelasjonskoeffisienten mellom observerte og simulerte grunnvannsnivåer er på 0.99. Kalibreringsplottet kan brukes for å se hvilke observasjoner som er for høye eller for lave, i hvilke perioder det skjer etc.. En ser i figur 16 at punktene ligger forholdsvis samlet langs linjen. Maksimalt avvik i residualene er på -0.68 og +0.34 m (tabell 11).

Den største feilen ligger i simuleringer av grunnvannsnivåer i UB2-UB3. Observasjoner i disse observasjonsbrønnene gir generelt lavere verdier enn simulerte. Nivelleringen av disse to peilerørene som ligger nordøst for Rena Kartong er veldig usikkert. I tillegg ligger dette området sør for samløpet med Rena. Dette gjør at vannstandsdata som vi bruker som input kan være noe feil, siden grunnlaget baseres kun på målinger av vannstand i Glomma utført nord for Prestsjøen og en estimering av gradient i Glomma.



Figur 16. Observerte vs. simulerte grunnvannsnivåer i perioden fra 01.02.2002 til 07.09.2002.

Den gjennomsnittlige verdien for residualene er på -0.01 m, standardavvik på 0.10 m. Differansen mellom estimerte og observerte grunnvannsnivåer kalles for residualer. Residualene skal være normalfordelte rundt kalibreringslinja. Dette sjekkes ved å lage et histogram for residualene og å anta en normalfordeling. Av figur 17 ser man at residualene følger normalfordelingen. Det er kun målinger i rør UB2-UB3 som ligger utenfor den normale fordelingen (se tidligere kommentarer).



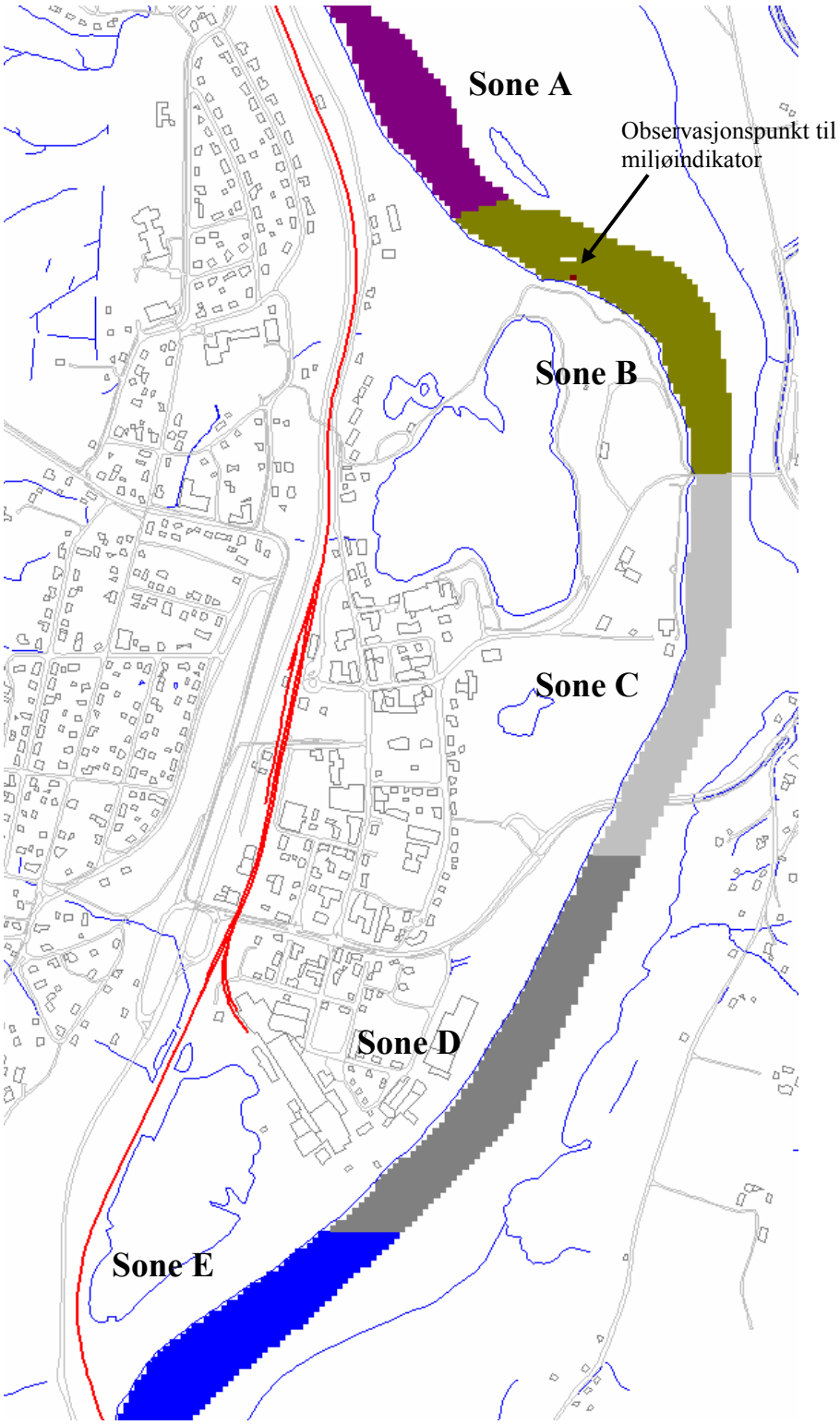
Figur 17. Histogram for residualene (differansen mellom estimerte og observerte grunnvannsnivåer).

3.1.3. Kalibrering av grunnvannstilsig fra platået (effektiv nedbør)

Det er lagt inn i Glomma 5 ”vannbalansesoner” for å analysere utvekslingsmengde mellom grunnvann og overflatevann (se figur 18). Arealet til disse sonene er angitt i tabell 12.

	Sone A	Sone B	Sone C	Sone D	Sone E
Antall celler	408	641	517	605	439
Areal i m^2	40 800	64 100	51 700	60 500	43 900

Tabell 12. Areal til de ulike vannbalansesonene vist i figur 18.

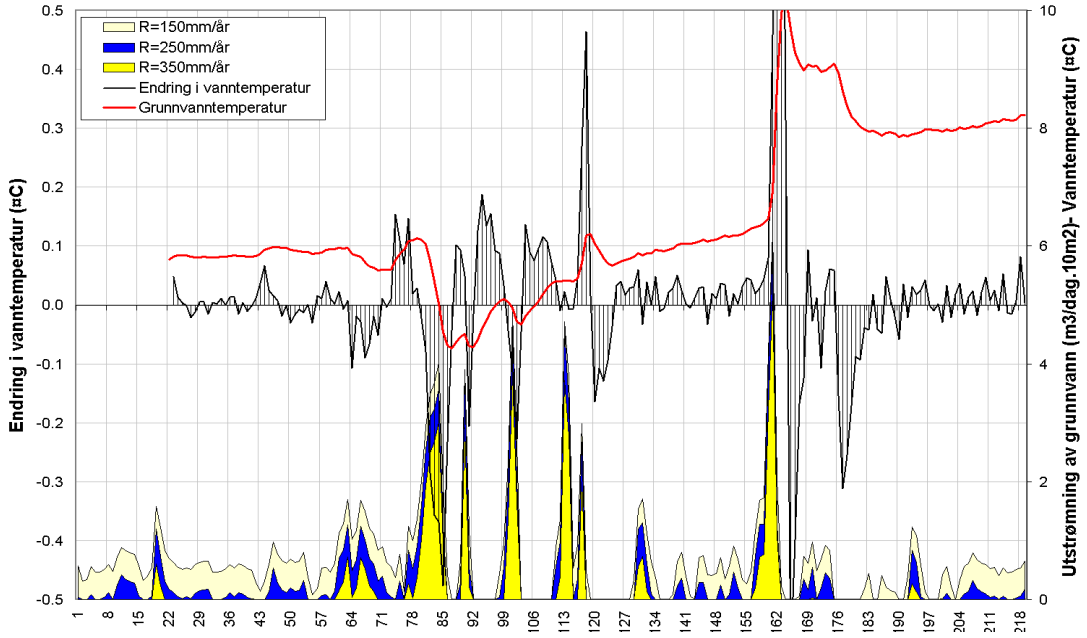


Figur. 18. Soner i Glomma hvor vannbalanse (innstrømning/utstrømning) beregnes.

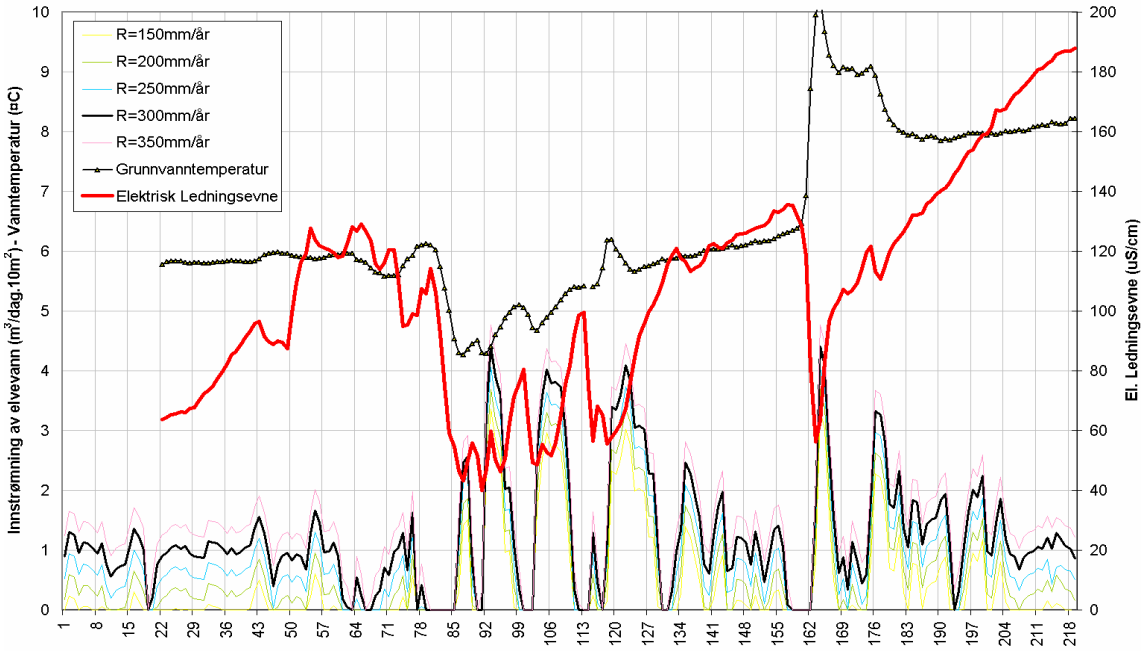
I tillegg beregnes vannbalanse i en celle som tilsvarer området hvor miljøindikator registreres. Det er resultatene av vannbalanseberegninger i denne cellen som sammenlignes med observasjoner av miljøindikatorer. Effektiv nedbør (grunnvanntilsig fra platået) er i utgangspunktet estimert ut fra månedlig nedbør målt i 2002 korrigert for snø, snøsmelting og evapotranspirasjon (Tabell 13). Figur 19 og 20 viser grunnvannsutstrømning og elvevannsinnstrømning beregnet for observasjonspunktet som funksjonen av effektiv nedbør. Større effektiv nedbør gir større grunnvannstilsig fra platået og større grunnvannsutstrømning. Kalibrering utføres ved å finne en effektiv nedbør som gir et vannutvekslingsmønster som er i tråd med målinger av miljøindikator. Estimert effektiv nedbør er gitt i tabell 13.

Måned (dagsnr.)	Nedbør mm/mnd	Nedbør mm/år	Kommentarer	Effektiv nedbør/tilsig mm/år
Februar (0-27)	51	612	Snø: lavt tilsig	300
Mars (27-58)	26	312	Snø: lavt tilsig	300
April (58-88)	44	528	Snøsmelting	350
Mai (88-119)	116	1392	1/3 nedbør	450
Juni (119-149)	83	996	1/3 nedbør	330
Juli (149-180)	95	1140	1/3 nedbør	360
August (180-211)	56	672	lavt tilsig	300
September (211-219)	24	288	veldig tørr minimum tilsig	275

Tabell 13. Observert nedbør i 2002 og estimert effektiv nedbør (grunnlag for grunnvannstilsig) etter kalibrering.



Figur 19. Utstrømningsmengde av grunnvann beregnet i "observasjonspunktet" (se figur 18) som funksjonen av effektiv nedbør sammenlignet med miljøindikatorer (Vanntemperatur målt under bunnen til Glomma).



Figur 20. Innstrømningsmengde av elvevann beregnet i "observasjonspunktet" (se figur 18) som funksjonen av effektiv nedbør sammenlignet med miljøindikatorer (Vanntemperatur og elektrisk ledningsevne målt under bunnen til Glomma).

3.2. Verifisering

Hensikten med verifisering er å kontrollere om modellen virkelig etterligner et naturlig system. Dette gjøres ved å undersøke hvor godt modellen reproduserer observerte grunnvannsnivåer. Dataene som benyttes i verifisering er ikke benyttet i kalibreringen. Transiente simuleringer er utført med data observert i 1999. Vi bruker samme prinsipp for å estimere tilsig fra platået (se tabell 14). I 1999 ble det utført sporstoff-forsøk ved reservekilden med en konstant utpumping på ca. 30 l/s. Modellering utføres derfor med et grunnvannsuttak på 2600 m^3/dag i pumpebrønn P1 (se rapport 2).

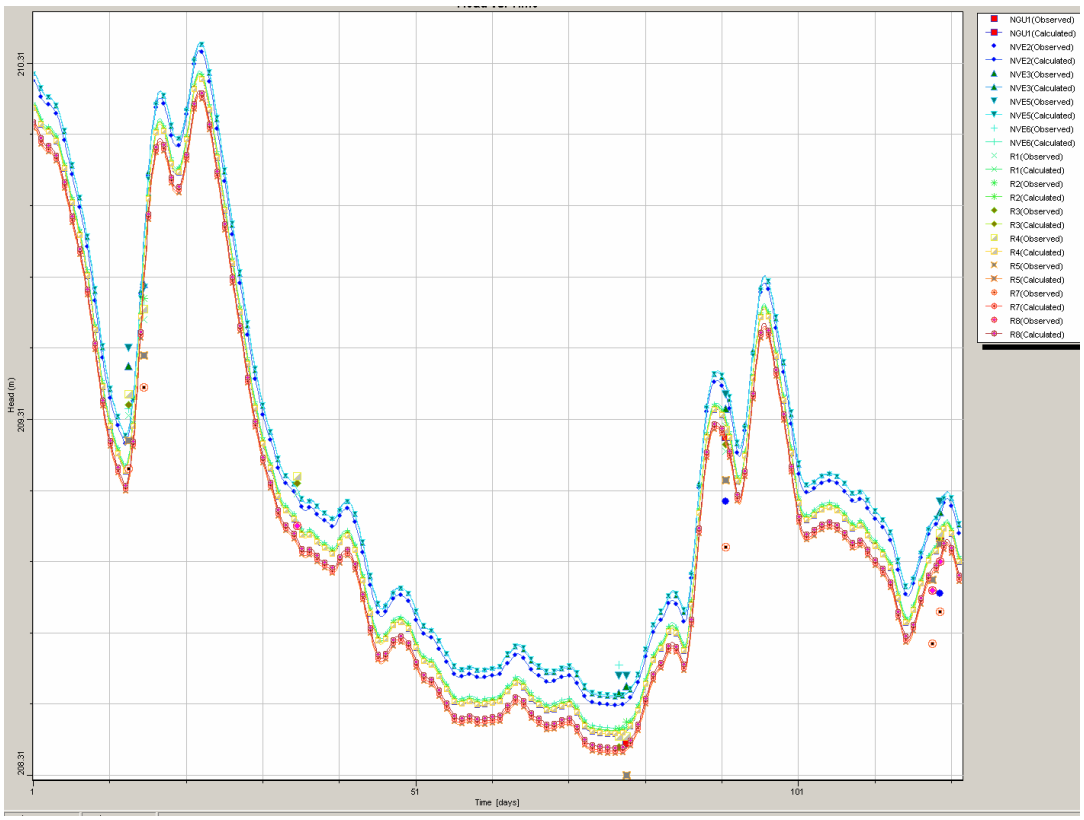
Måned (dagsnr.)	Nedbør mm/mnd	Nedbør mm/år	Kommentarer	Effektiv nedbør/ grunnvannstilsig mm/år
Juli (0-31)	62	744	lavt tilsig	300
August (31-62)	58	696	lavt tilsig	300
September (62-92)	110	1320	1/3 nedbør	450
Oktober (91-122)	61	756	lavt tilsig	300

Tabell 14. Estimert effektiv nedbør og grunnvannstilsig fra platået i 1999.

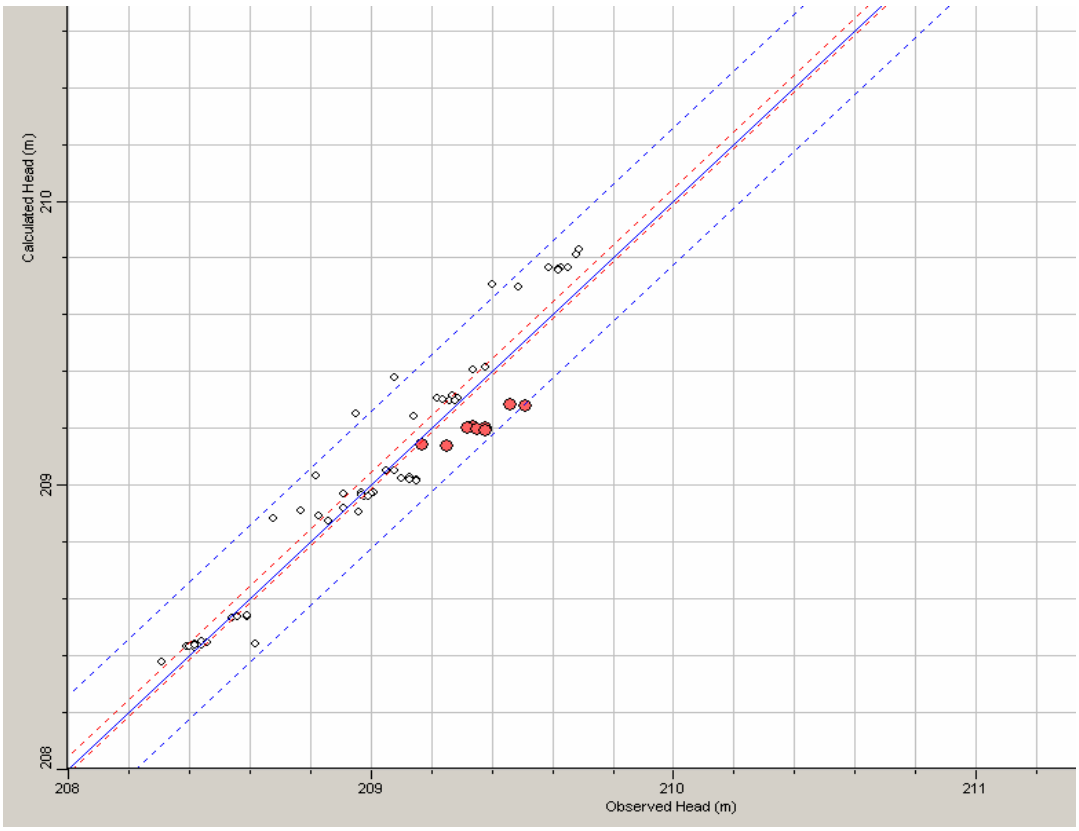
Resultatene (tabellene 14-15 og figurene 21-22) viser at modellen klarer å simulere grunnvannsnivåer ved reservekilden på en tilstrekkelig måte. Residualene følger en normal fordeling. RMS-verdien, en god indikasjon på modellnøyaktighet, er imidlertid større enn ved modellen for 2002. Dette skyldes et mindre antall observasjoner, antall observasjonsrør, og en kortere simulert periode med en mindre variasjon i vannstandene i modellert periode (mangler vårflom).

Number of observations	64
Standard error of estimate (Residual mean)	0.015 m
Absolute residual mean	0.091 m
Root mean squared	0.120 m
Sum of squared weighted residuals (RMS)	8.7 %
Maximum weighted residual	0.30 m
Minimum weighted residual	-0.23 m

Tabell 15. Resultater fra verifisering (1999 med pumping).



Figur 21. Observerte (punkter) og simulerte grunnvannsnivåer (kurver) i perioden fra 01.07.1999 til 30.10.1999.



Figur 22. Observerte vs. simulerte grunnvannsnivåer i perioden fra 01.07.1999 til 31.10.1999.

4. Følsomhetsanalyser

Hensikten med følsomhetsanalyser er å undersøke hvor mye en kan endre parametrene i modellen før resultatet endres. Dette kan gjøres manuelt ved å øke eller minske parametrene trinnvis. PEST, som brukes for å utføre automatisk kalibrering, gir også indikasjoner på parameterfølsomhet. Vi presenterer her derfor informasjon om parameterfølsomhet avledet fra resultatene til den automatiske kalibreringen, og deretter fra manuelle analyser. Betydning av antall tidssteg og tidsenheter på modellresultater analyseres også.

4.1. Analyse av PESTs resultater

Resultatene presentert tidligere i tabellene 10 og 11 gir en indikasjon på parametrenes usikkerhet. Høy usikkerhet indikerer en forholdsvis lav følsomhet på den aktuelle parameteren (se f. eks. Ss2 og Ss3). Tabell 16 viser at det spesielt er Sy_2 som må anses som veldig usikker. Alle de andre parametrene har et standardavvik lavere enn 0.004.

	Kx_1	Kx_2	Ss_1	Ss_2	Sy_1	Sy_2
Standard avvik	0.0001	0.0015	0.0005	0.0014	0.0001	0.038

Tabell 16. Parametrenes usikkerhet (standardavvik).

	Kx_1	Kx_2	Ss_1	Ss_2	Sy_1	Sy_2
Kx_1	1	-0.94	0.12	0.04	0.18	0.22
Kx_2	-0.94	1	-0.18	0.02	- 0.27	0.20
Ss_1	0.12	- 0.18	1	-0.86	0.04	0.20
Ss_2	0.04	0.02	-0.86	1	- 0.03	0.59
Sy_1	0.18	- 0.27	0.04	- 0.03	1	0.09
Sy_2	0.22	- 0.21	0.20	- 0.59	0.09	1

Tabell 17. Korrelasjonskoeffisient av residualer.

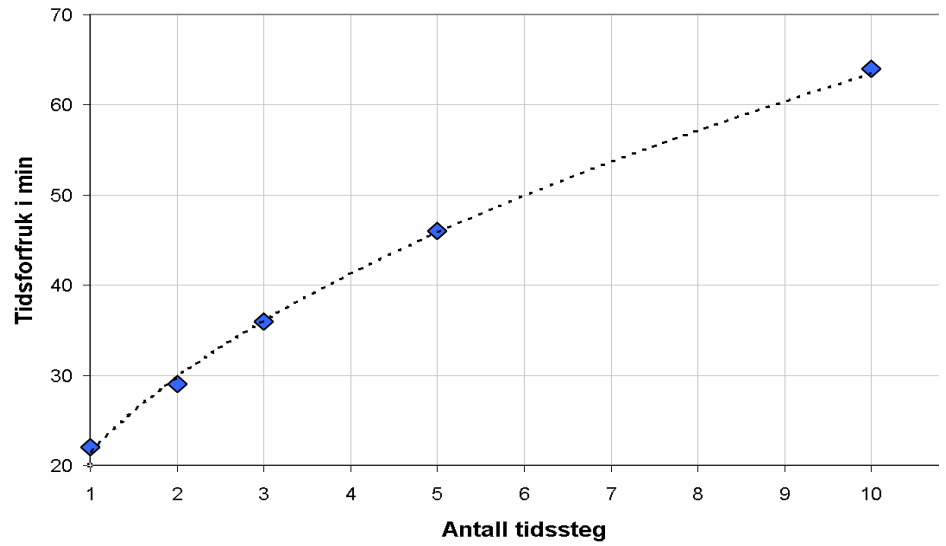
Den viktigste informasjonen om parametrenes følsomhet får man gjennom analyse av residualer. Tabell 17 viser en korrelasjonsmatriks mellom de 6 justerbare parametrene.

Det er kun parametrene Kx_1 og Kx_2 som viser en betydelig korrelasjon (-0.94). Korrelasjonen er negativ, dette betyr at høyere Kx_1 må balanseres med forholdsvis lavere Kx_2. Dette kan resultere i at løsningen ikke er helt unik.

4.2. Betydning av antall tidssteg og tidsenheter

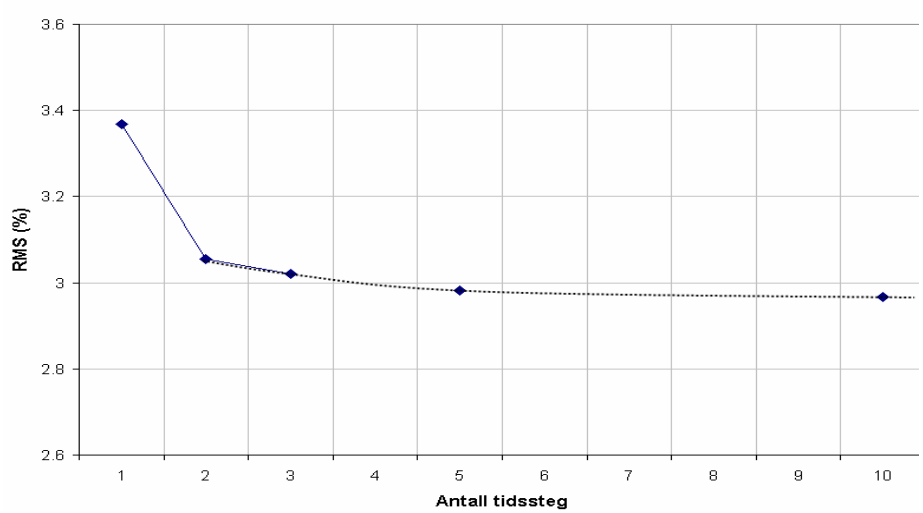
4.2.1. Betydning av antall tidssteg på modellresultater

En stressperiode er definert som en tidsperiode hvor all belastning (”stress” på engelsk) i modellen er konstant. Med belastning menes f. eks. pumping, endring i elvevannstand eller grunnvannstilsig fra platået. Et tidssteg (”time step” på engelsk) er en slags iterasjon i modellen. Som tommelfingerregel burde man bruke et tidssteg som er mellom 5 og 10 ganger mindre enn tidsskalaen på de observerte endringene. På Rena-modellen anvender vi daglige målinger av vannstand. Det betyr at vi i teorien burde simulere døgnendringene med tidssteg mellom 4.8 og 2.4 timer. Til og med slike små tidssteg fører til langvarige simuleringer. Spesielt i flomperioder burde tidssteget reduseres betraktelig for at modellen skal kunne behandle endringene i Glommas vannstand på en forsvarlig måte. Modflow er ikke utstyrt med en automatisk tidsstegfunksjon og kjører tidsavhengige simuleringer med 10 tidssteg som standard for hver stressperiode.



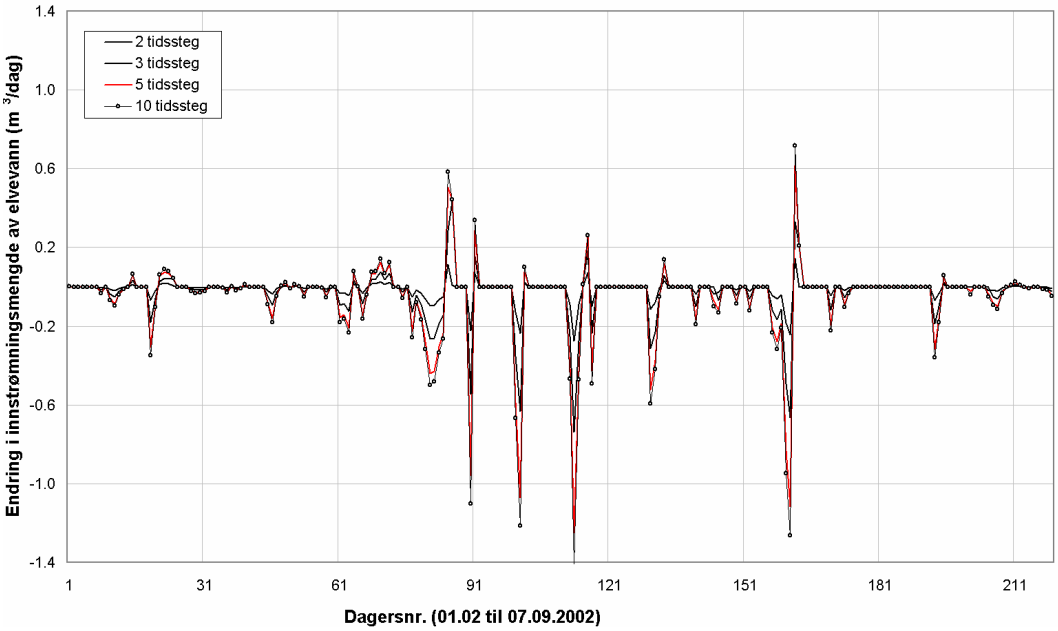
Figur 23. Tidsforbruk som en funksjon av antall tidssteg ved kjøring av modellen (123 dager). Det er brukt en Pentium III - 1200MHZ og 256 MB Ram.

Antall tidssteg påvirker kraftig tidsforbruk ved kjøring av modellen (se figur 23) men også nøyaktigheten til resultatene. RMS (standardavvik av residualer) er ansett som det beste målet på avvik mellom estimerte og observerte data og gir derfor et godt bilde av nøyaktigheten til resultatene. Ut fra figur 24 ser vi ar RMS er redusert kraftig fra 1 til 3 tidssteg og at bruk av mer enn 3 tidssteg har veldig liten påvirkning på nøyaktigheten til resultatene.



Figur 24. RMS (standardavvik av residualer) som en funksjon av antall tidssteg.

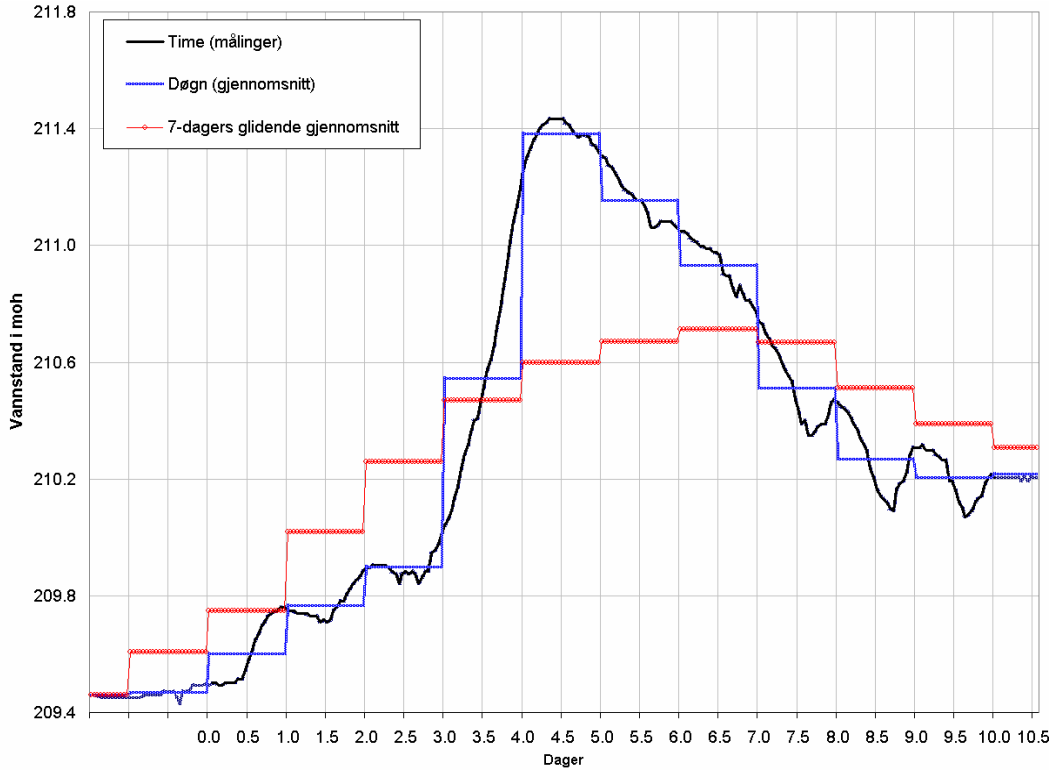
Figur 25 viser at bruk av for lite antall tidssteg kan føre til en underestimering av vannutveksling mellom grunnvann og overflatevann. Innstrømning av elvevann i akviferen er f. eks. undervurdert i perioder med flom. Et minimum av 3 tidssteg vil derfor brukes for å utføre analysene av interaksjon grunnvann/overflatevann.



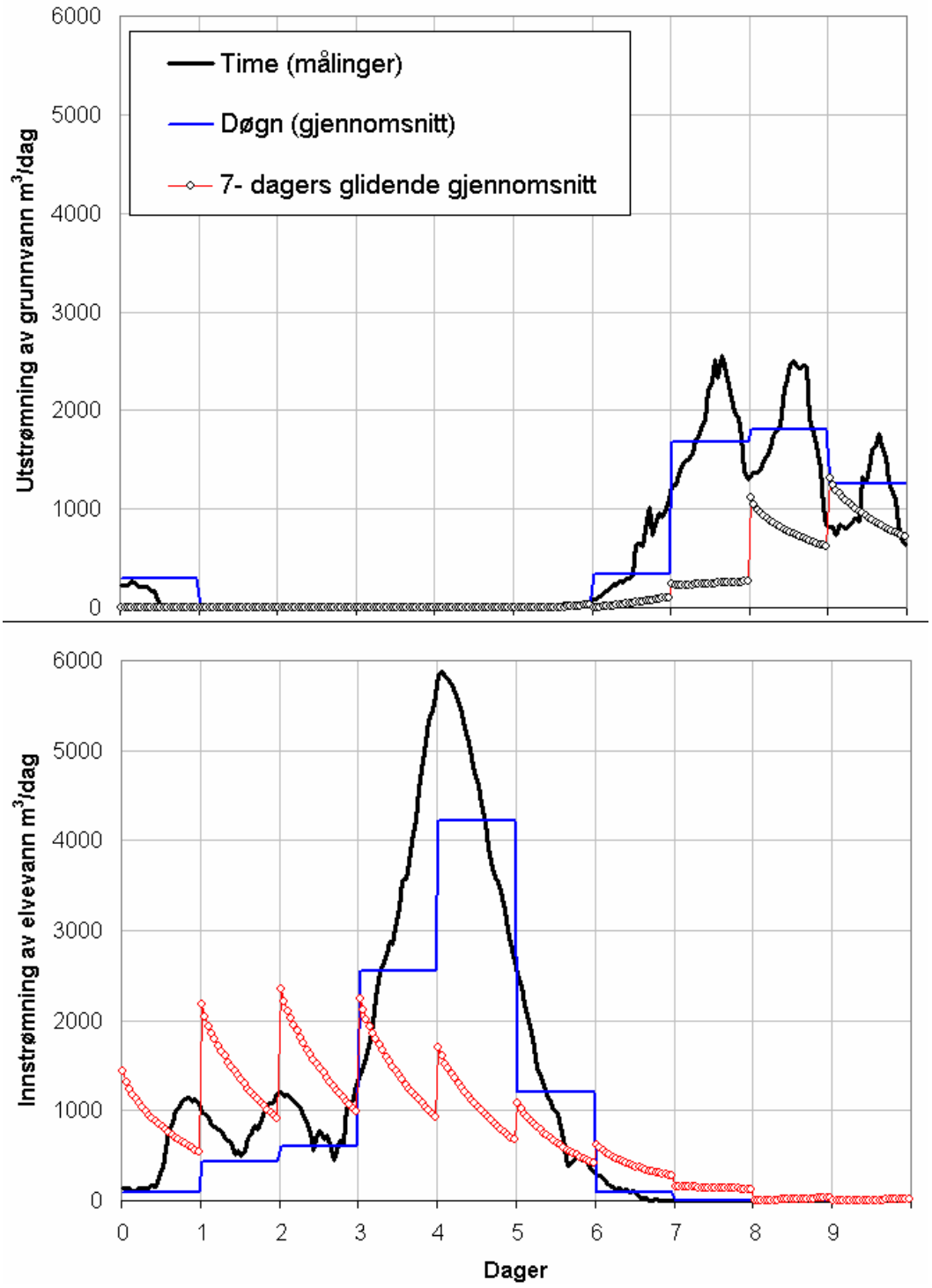
Figur 25. Endring i innstrømningsmengde av elvevann (m^3/dag.10m^2) beregnet i ”observasjonspunktet” (se figur 20) ved ulike antall tidssteg i forhold til kjøring av modellen med kun 1 tidssteg.

4.2.2. Simuleringer med ulike tidsenheter

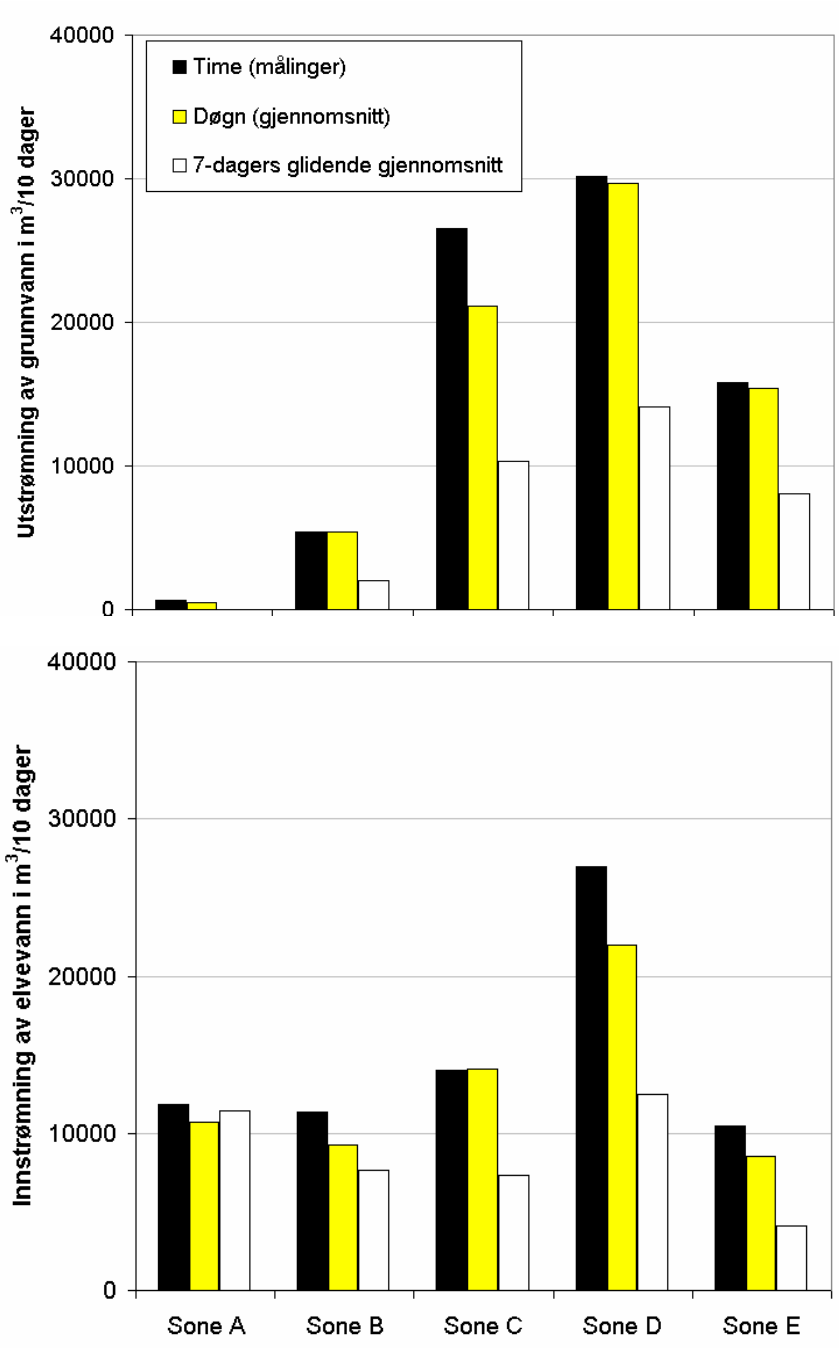
Siden endringer i vannstander i Glomma kan være hyppige, har vi testet betydningen av tidsenheter på resultatene. Resultatene fra modellkjøring på time-, dag- og ukebasis er sammenlignet. Pga. krevende tidsforbruk og minne ved kjøring på timebasis har vi valgt å sammenligne resultatene i en kortere periode. Den aktuelle perioden består av 10 dager som dekker en liten flomperiode (08.07.2002 kl. 00:00 til 17.07.2002 kl. 23:00). Observasjonene er registrert på timebasis (loggere). Daglige verdier er beregnet som gjennomsnittsverdier (24 timer), mens ukentlige verdier som 7-dagers glidende gjennomsnitt av daglige verdier (figur 26). Vi anvender her et 7-dagers glidende gjennomsnitt fordi vi ønsker å kjører modellen kun for en 10-dagers periode.



Figur 26. Elvevannstand i simuleringsperioden (08.07 til 17.07.2002). Observasjonene er registrert på timebasis (loggere). Daglige verdier er beregnet som gjennomsnittsverdier (24 timer), mens ukentlige verdier som 7-dagers glidende gjennomsnitt av daglige verdier.



Figur 27. Betydning av tidsenheter på vannutvekslingsmengde beregnet i vannbalansesone B. Total utstrømningsmengde av grunnvann (øverst) og innstrømningsmengde av elvevann (nederst) i sone B er angitt i m^3/dag. En utstrømningsmengde på 4000 m^3/dag tilsvarer ca. 60 mm vann/dag i sone B.



Figur 28. Betydning av tidsenheter på vannutvekslingsmengde beregnet i 5 vannbalansesoner. Total utstrømningsmengde av grunnvann (øverst) og innstrømningsmengde av elvevann (nederst) er angitt i m^3/dag for en 10 dagers periode.

%	Sone A	Sone B	Sone C	Sone D	Sone E	Alle soner
Utstrømning av grunnvann i %						gjennomsnitt
Døgn	73	101	80	98	97	92
Uke	1	38	39	47	51	44
Innstrømning av elvevann i %						
Døgn	90	81	100	82	82	86
Uke	97	67	52	46	39	57

Tabell 18. Endring i utvekslingsmengde i % i forhold til simulering på timebasis.

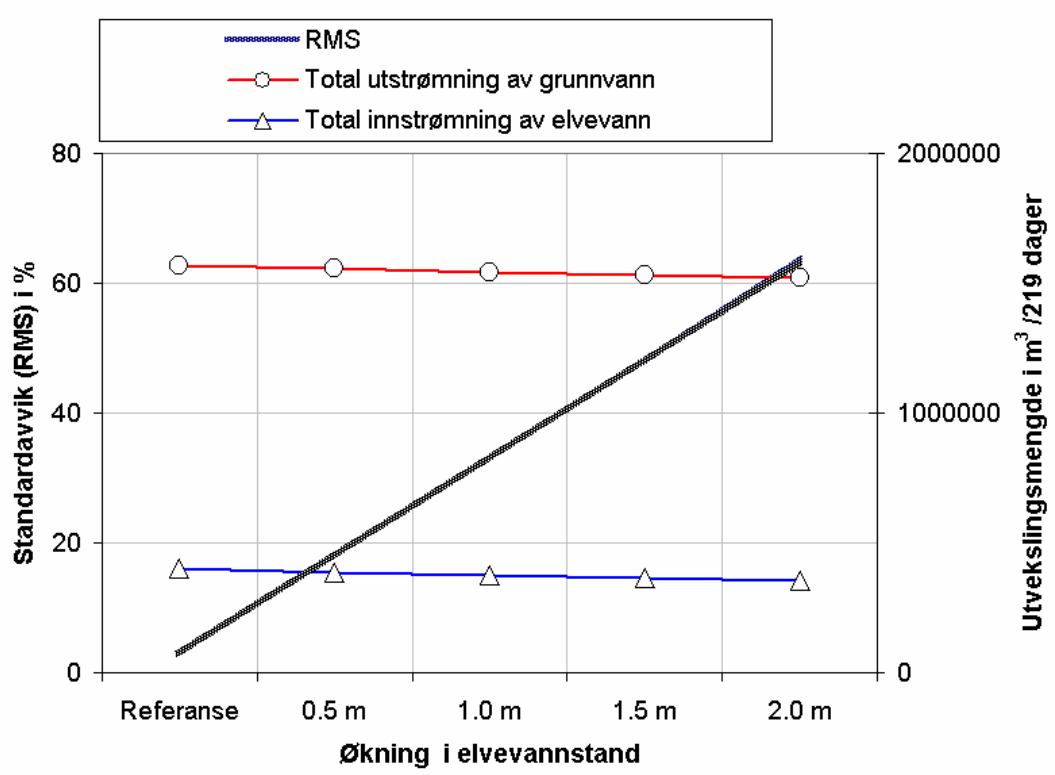
Resultatene (figur 27-28 og tabell 18) viser at utvekslingsmengde er underestimert ved bruk av døgn (gjennomsnitt) eller 7-dagers glidende gjennomsnitt. Bruk av daglige målinger kan imidlertid ansees som tilfredsstillende siden det gir en total utvekslingsmengde som ligger rundt 90 % av beregningen utført med timebasismålinger.

4.3. Følsomhet til enkelte parametre

Vi analyserer her betydningen av enkelte grensebetingelser (elvevannstand, grunnvannstilsig fra platået) og egenskapene til Glommas bunnsedimenter (mektighet og permeabilitet) på modellresultater. Analysene utføres ved å endre trinnvis de aktuelle parametrene og evaluere betydningen på RMS (standardavvik av residualer) og vannutvekslingsmengde mellom grunnvannsmagasinet og Glomma. Den automatiske kalibreringen med PEST gir indikasjoner på følsomheten til de 6 justerbare parametrene.

4.3.1. Følsomhet i forhold til elvevannstand

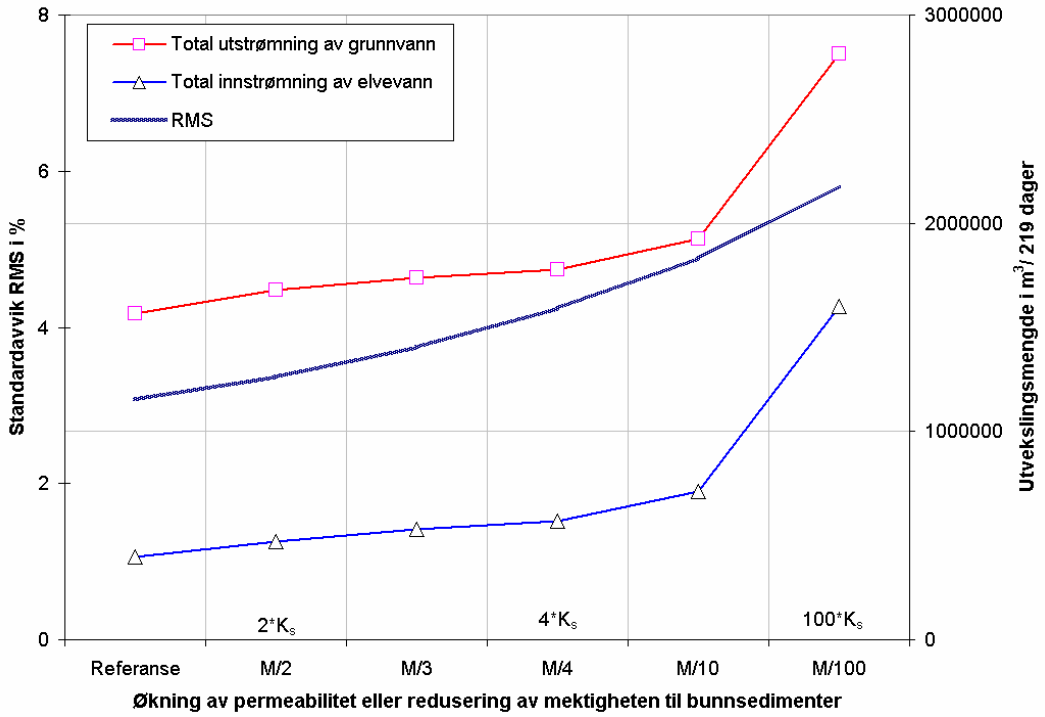
RMS er meget følsomt overfor endringer i elvevannstand. Dette gjenspeiler at grunnvannsnivåene er veldig følsomme for elvevannstand, og at det er god kommunikasjon mellom Glomma og grunnvannsmagasinet. Figur 29 viser at økningen i elvevannstand imidlertid har liten betydning for vannutvekslingsmengde mellom grunnvannsmagasinet og Glomma. Dette blir bedre analysert i neste kapittel.



Figur 29. Standardavvik til residualer (RMS) og totale utvekslingsmengder (m^3) i 219 dager (alle vannbalansesoner) som en funksjon av elvevannstand (økning i forhold til referansen: observasjoner målt i 2002).

4.3.2. Følsomhet i forhold til endringer i egenskapene til bunnsedimenter

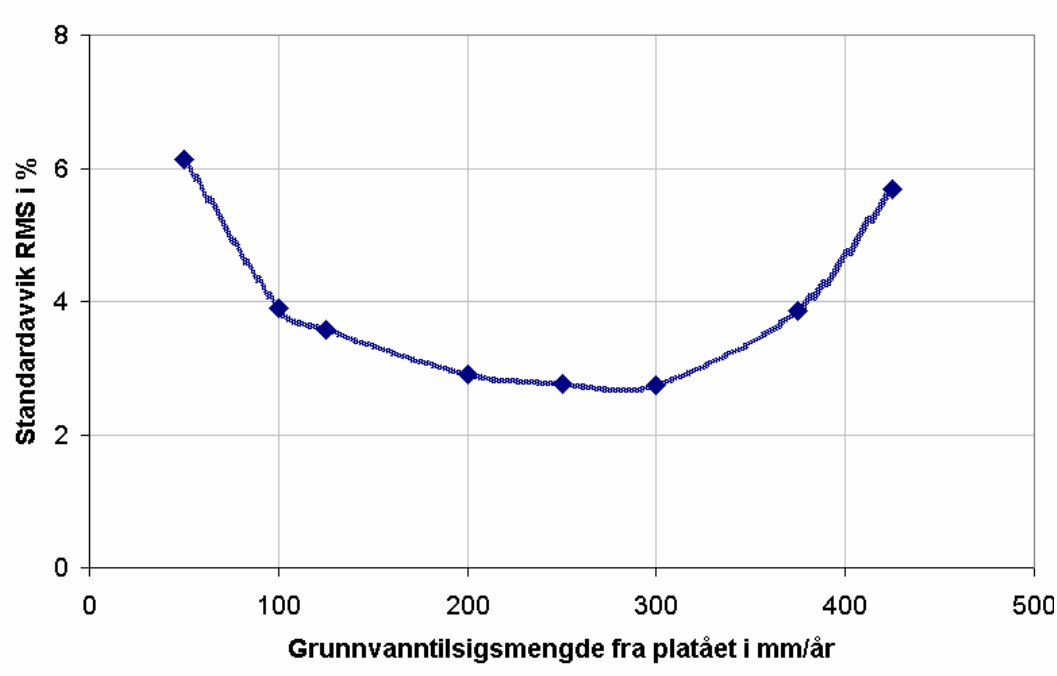
RMS er relativt lite følsomt for endringer i permeabiliteten eller mektigheten til Glommas bunnsedimenter. Dette betyr at feil ved kartlegging av bunnsedimentene ikke har stor betydning for beregnede grunnvannsnivåer. Endring i egenskapene til bunnsedimenter har derimot stor betydning for vannbalanse og utvekslingsmengde mellom grunnvannsmagasinet og Glomma (figur 30).



Figur 30. Standardavvik til residualer (RMS) og total utvekslingsmengde i 219 dager (alle vannbalansesoner) som en funksjon av egenskapene til bunnsedimenter i sonene A og B (lavere mektighet eller høyere permeabilitet i forhold til referansen).

4.3.3. Følsomhet i forhold til endringer i grunnvannstilsigsmengde fra platået

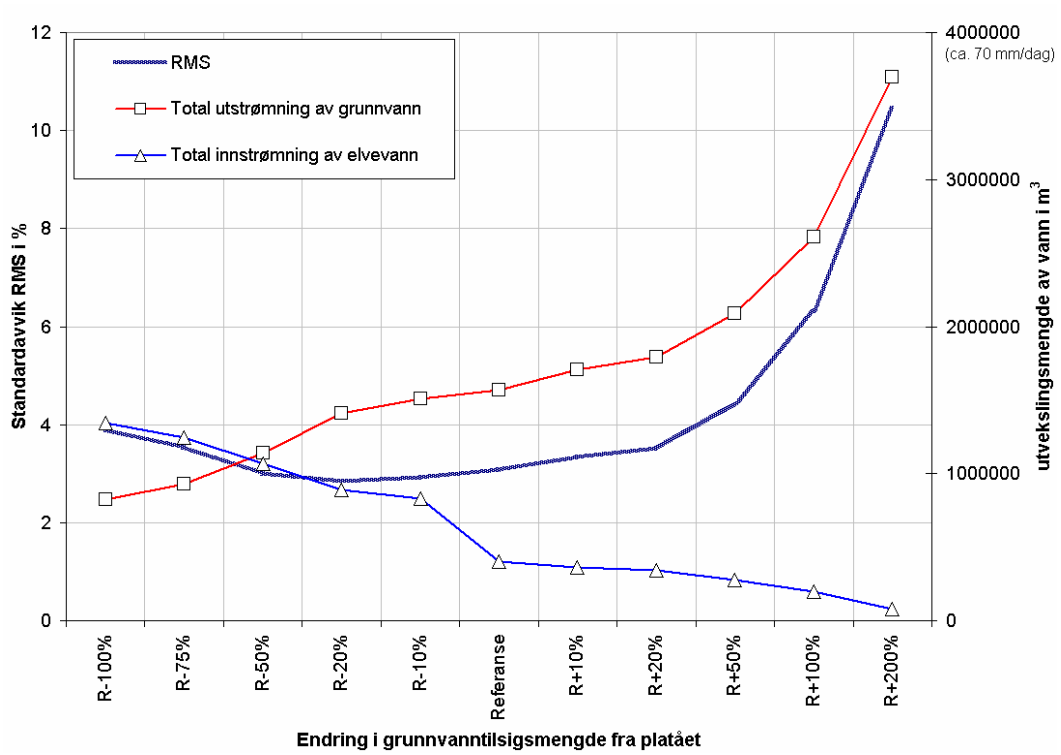
Grunnvannstilsig fra platået er vanskelig å estimere (se diskusjon i rapport 2 og i denne rapporten i avsnitt 3.1.3). Det er derfor interessant å evaluere effekt av endring i grunnvannstilsigsmengden fra platået (simulert gjennom effektiv nedbør) på nøyaktigheten til modellresultater.



Figur 31. Standardavvik til residualer (RMS) som en funksjon av grunnvannstilsig fra platået/effektiv nedbør. Mengden er her konstant over hele året.

I figur 31 er grunnvannstilsiget satt konstant over hele simuleringsperioden. Figur 31 viser at RMS er relativt stabilt med verdier over 100 mm og under 350 mm vann. Figur 32 viser på samme måte at en endring på 10-20 % har liten effekt på kalibreringsresultater, dvs. på simulerte grunnvannsnivåer.

Figur 32 viser at modellen er mer følsom for en økning av tilsigsmengden fra platået enn en tilsvarende reduksjon.



Figur 32. Standardavvik til residualer (RMS) og total utvekslingsmengde i 219 dager (alle vannbalansesoner) som en funksjon av grunnvannstilsig fra platået (endring i % av månedlig effektiv nedbør).

5. Analyser

Modellen anvendes for å evaluere effekt av elveregulering, grunnvanns-uttak og redusert grunnvannsdannelse. Vi analyserer først naturlige variasjoner i vannutvekslingsmengder mellom grunnvannsmagasinet og Glomma i løpet av et normalt år med lavvann, normal vannføring og flom. Vi evaluerer deretter betydningen av grunnvannstilsig fra platået, av egenskapene til Glommas bunnsedimenter (permeabilitet og mektighet), og av elvevannstand på strømningsforhold og utvekslingsmengder. Til slutt settes det fokus på å evaluere konsekvenser av reguleringen til Glomma og utnyttelse av grunnvannsressurser i Rena.

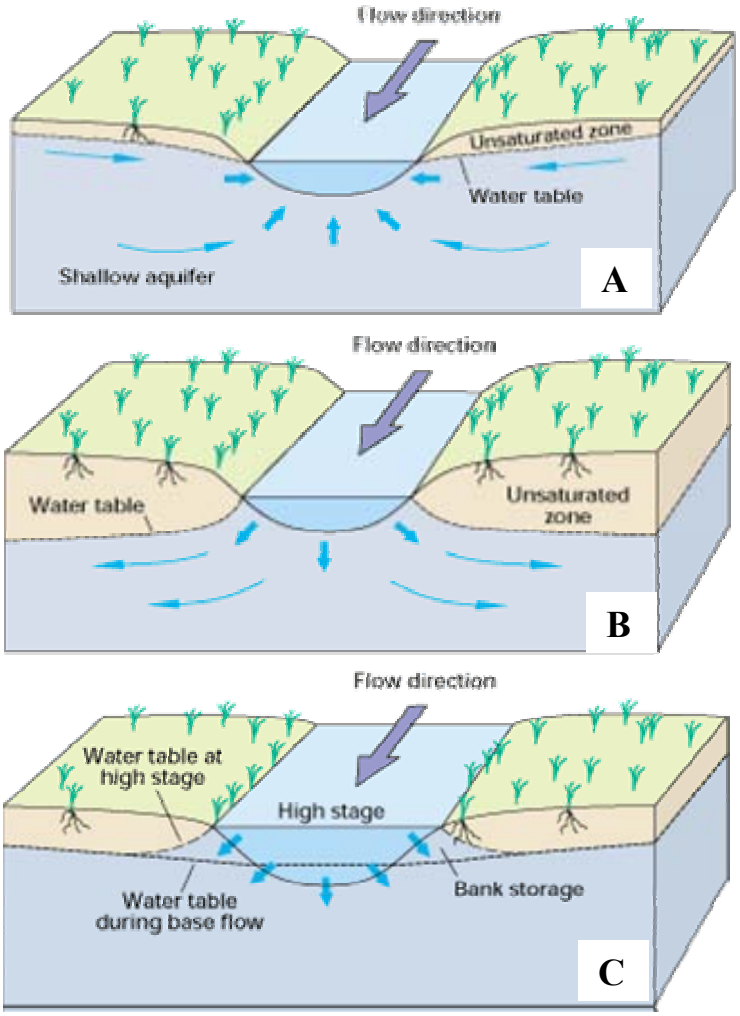
5.1. Strømningsforhold og vannutveksling

Interaksjon mellom grunnvann og elvevann kan generelt beskrives på tre måter (figur 33):

- elva mates av grunnvannsmagasinet ved utstrømning av grunnvann inn i elva;
- elva mater grunnvannsmagasinet ved innstrømning av elvevann;
- begge prosessene skjer samtidig, men i ulike tidspunkter eller områder.

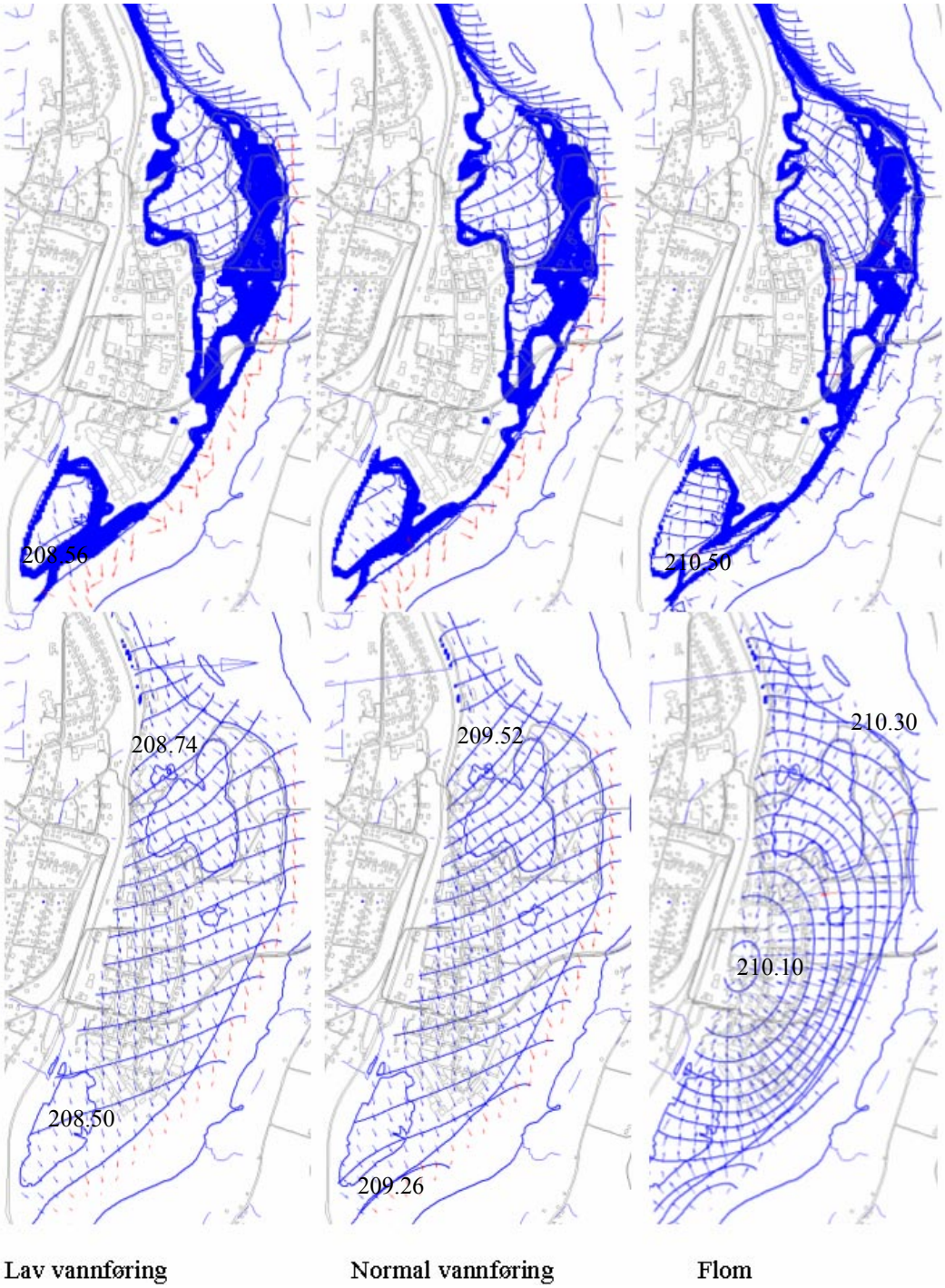
Oftest yter grunnvannsmagasinene langs elva et tilskudd til vannføringen, men det er ikke uvanlig med infiltrasjonsområder der elva gir tilskudd til grunnvannsmagasinene, spesielt i sletteområder der elva renner i store meandrer og hvor vannet søker seg korteste vei. Det samme elveløpet vil kunne mate grunnvannsmagasinet i flomperioder og få tilskudd av vann i tørre perioder.

Det er gradienten mellom grunnvannet og overflatevannet som styrer vannutvekslingen. Når grunnvannstanden er høyere enn elvevannstanden, strømmer grunnvannet mot elvevannet. Videre når elvevannstanden er høyere enn grunnvannstanden, strømmer elvevannet inn i grunnvannsmagasinet.

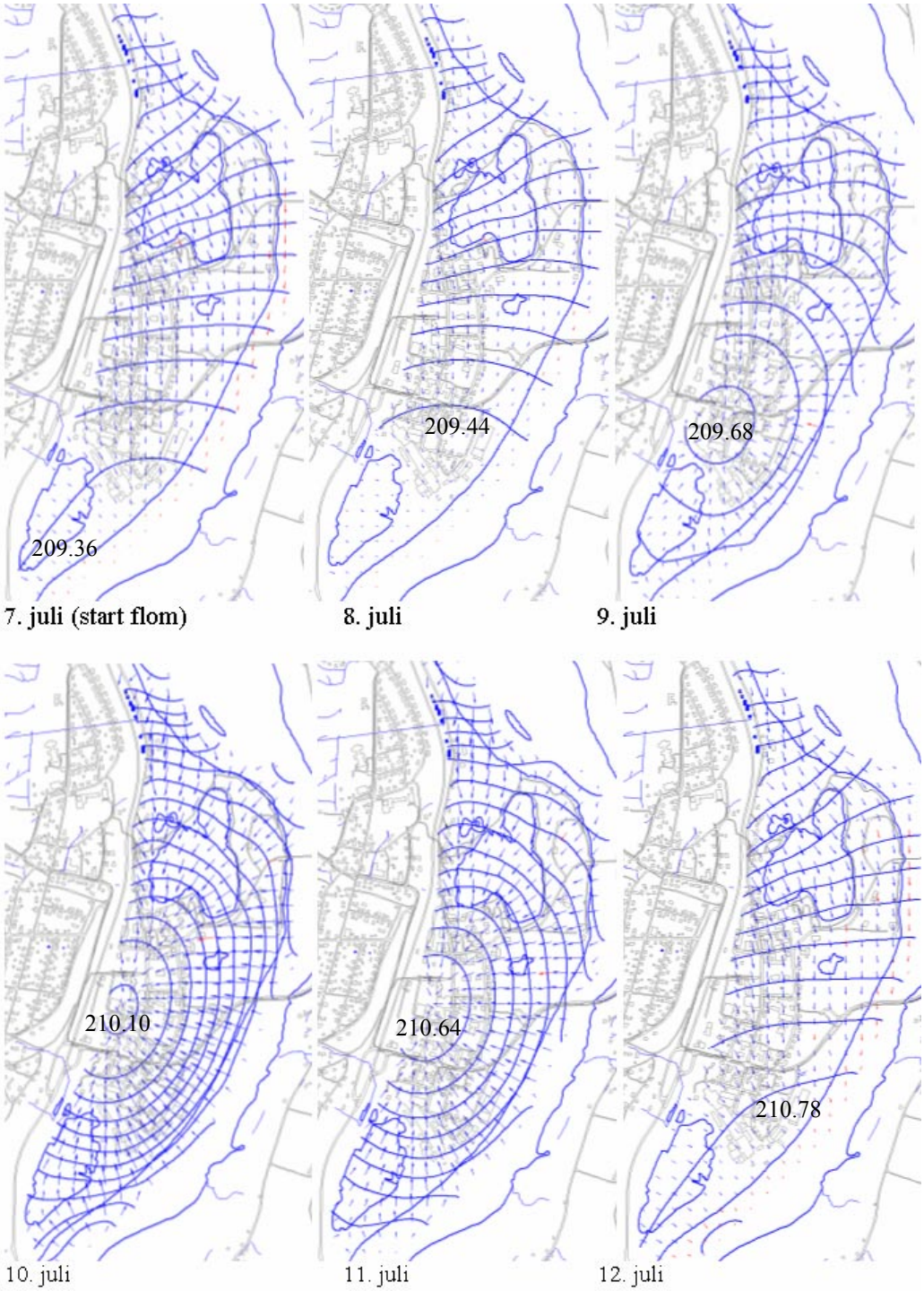


Figur 33. Skisse som viser interaksjon mellom elvevann og grunnvann. A: elva mates av grunnvanntilsig. B: elva mater grunnvannsmagasinet. C: elva mater grunnvannsmagasinet kun ved flom. Hentet fra USGS. Geological Survey Circular 1139, 1998.

En rask økning av elvevannstand fører til at elvevannet strømmer inn i elvebreddene. Denne prosessen, kalt ”bank storage” på engelsk, kan skyldes rask snøsmelting, kraftig regn (flom), eller tømming av et vannmagasin. Mesteparten av vannmengden som strømmer inn i grunnvannsmagasinet, går tilbake til elva når vannstanden synker igjen. Prosessen fører til en temporær lagring av elvevann. Den er rask (noen timer eller få dager), men kan bidra til å redusere flomtoppene. Hvis elvevannet er så høyt at hele elvesletta blir oversvømt, oppstår omfattende grunnvannsdannelse i det oversvømte arealet. I det tilfellet vil tida for at det nydannete grunnvannet går tilbake til elva blir lengre, fordi grunnvann beveger seg langsommere enn overflatevann.



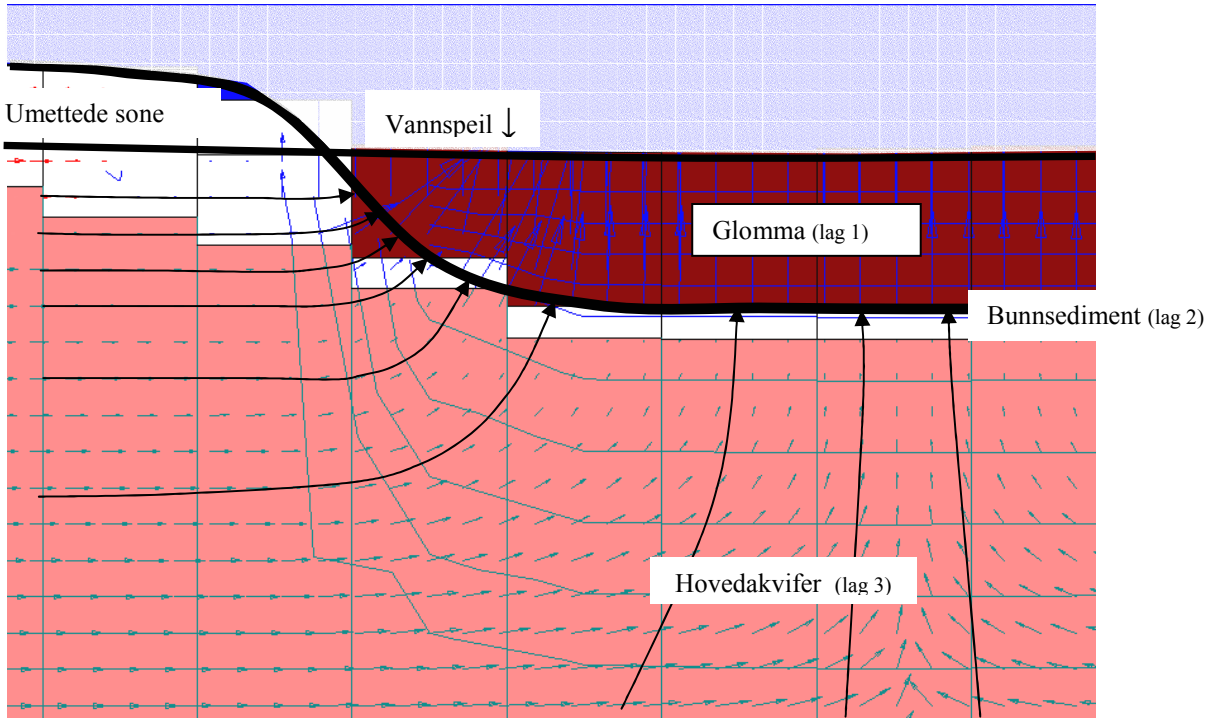
Figur 34. Grunnvannstrømningsbilder inn i lag 2 (øverst, siltig sand/bunnsedimenter) og lag 3 (nederst: hovedakvifer) ved lav, normal og høy vannføring. Pilene indikerer strømretninger. Størrelsen til pilene er proporsjonal med strømmengden. Linjene indikerer grunnvannsnivåene (2 cm ekvidistanse). Grunnvannsnivåer er angitt i m.o.h.



Figur 35. Grunnvannstrømningsbilder i hovedavkviferen (lag 3) i en periode med flom (juli 2003). Pilene indikerer strømretninger. Størrelsen til pilene er proporsjonal med strømmengden. Linjene indikerer grunnvannsnivåene (2 cm ekvidistanse). Grunnvannsnivåer er angitt i m.o.h.

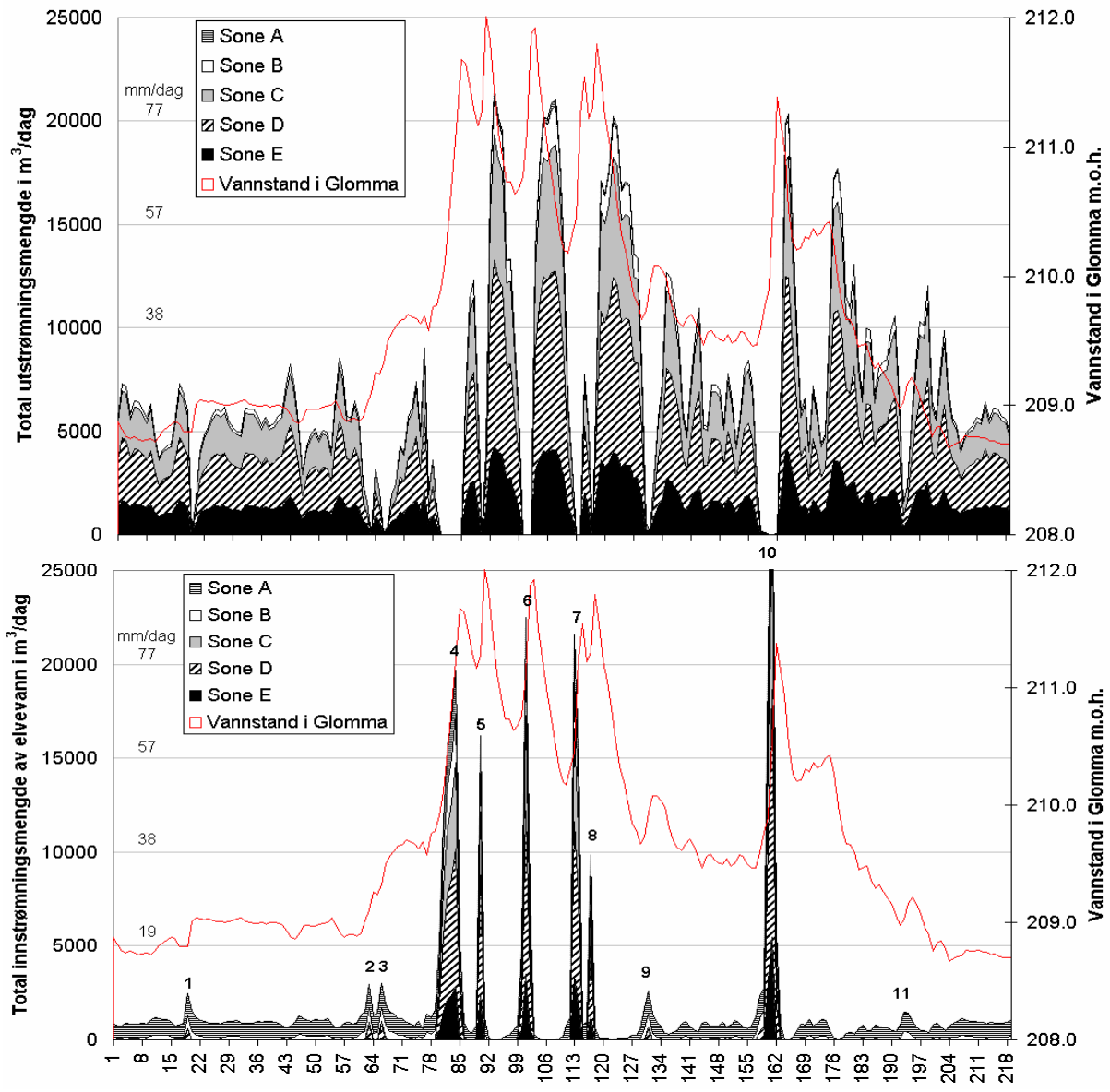
Figur 34 viser simulerte grunnvannstrømningsbilder ved lav, normal og høy vannføring på Rena i perioden fra 01.02.2002 til 07.09.2002. Grunnvannsnivåene varierer kraftig i takt med elvevannstanden, men strømningsbildet er relativt konstant over hele året. Det registreres ikke noen spesielle endringer mellom normal vannføring og lavvannføring (vinterforhold). Det er kun ved raske endringer av elvevannstand (flom) at strømningsbildet endrer seg kraftig. Figur 35 viser betydning av en liten flomperiode (5.-12. juli 2002) på strømningsbildet. Endringene i strømningsbildet er raske og varer kun få dager (3 dager for flommen i juli).

Endringer i strømningsbilder ved et normalt år kan være litt underestimert fordi i vår modell antar vi en konstant gradient i Glomma langs elvesletta. I virkeligheten varierer denne gradienten i takt med vannføringen. Gradienten er større ved flom og lavere ved lavvannføring (se tabell 5 i rapport 2).

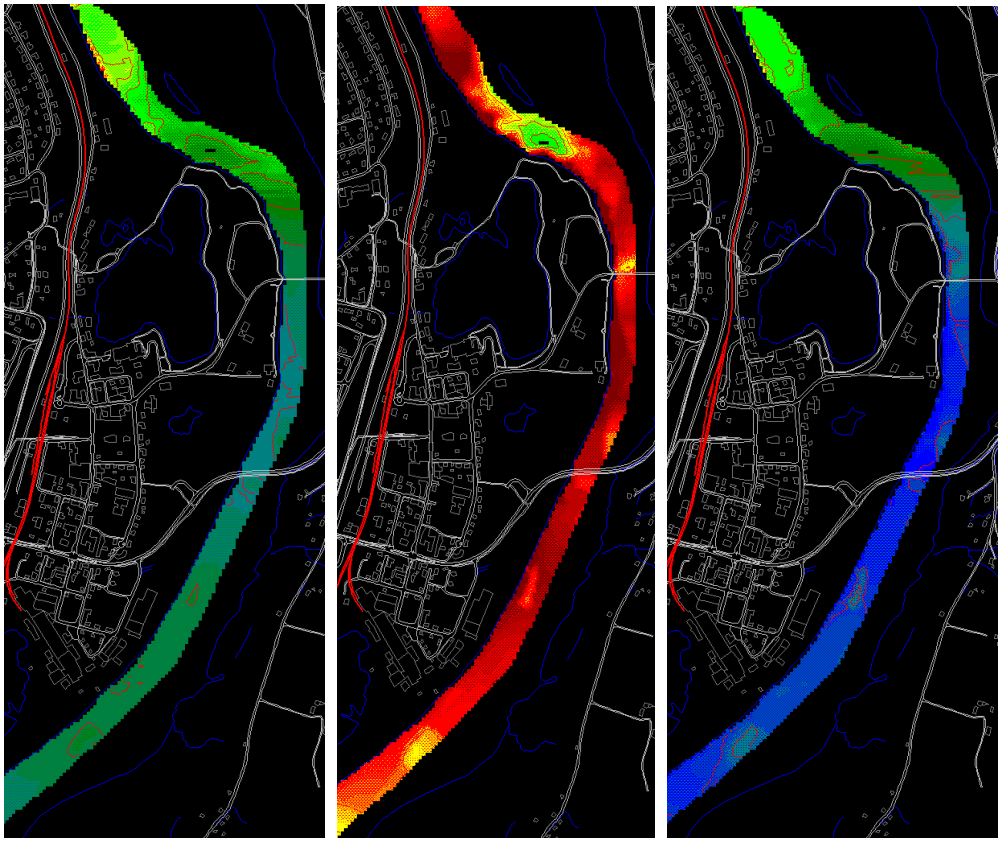


Figur 36. Utstrømning av grunnvann inn i elva gjennom bunnsedimentene. Trykklinjene er tettere ved elvebredden og indikerer en større strømmengde ved elvebredden enn i midten av Glomma.

P.g.a. høyere trykkforskjell ved elvebredden er vannutvekslingsmengden vanligvis større ved elvebredden enn i midten av elva (se figur 36). Enkelte heterogeniteter i bunnsediment eller i den underliggende akviferen (kanalstrømning) kan imidlertid gjøre at det ikke nødvendigvis er på elvebredden den største delen av utvekslingen forekommer.



Figur 37. Vannutvekslingsmengder (angitt i m^3/dag og mm/dag) og vannstand i Glomma som funksjon av tid (01.02 til 07.09.2002) i de ulike vannbalansesoner (se figur 18). Tallene (nederste figur) tilsvarer episodene hvor utstrømning av grunnvann er betydelig redusert og balanseres av innstrømning av elvevann.



Normal vannføring (7. juli) **Flom (10. juli)** **Etter flom (13. juli)**

mm/dag	**>20**	**15**	**10**	**5**	**0**	**5**	**10**	**>15**
	Innstrømning av elvevann					**Utstrømning av grunnvann**		

Figur 38. Utvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet angitt i mm/dag. Kalibrert modell.

Figur 37 viser vannutvekslingsmengder som en funksjon av tid i de ulike vannbalansesoner. Figur 38 viser vannutvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet ved normal vannføring, flom og rett etter flom.

I simuleringsperioden (figur 37) forekommer 11 episoder hvor utstrømning av grunnvann er betydelig redusert, og balanseres av innstrømning av elvevann. I 6 av disse episodene er hele utstrømningen av grunnvann stoppet opp og innstrømning av elvevann økt betydelig (10-15 ganger større enn før). Disse 6 episodene tilsvarer flomepisoder i Glomma: vårflom for de 5 første + en flom midt i juli (nr. 10). Disse episodene karakteriseres av høy innstrømning av elvevann i alle vannbalansesoner.

Innstrømning av elvevann øker raskt først oppstrøms og deretter nedstrøms. Størst økning registreres i sonene C, D og E (se figur 18) hvor innstrømningen av elvevann ved normal vannføring er lik null.

Prosessene som forekommer i flomperioder består av fire steg:

- Utstrømning av grunnvann er først stoppet opp ved rask økning av elvevann;
- Innstrømning av elvevann inn i grunnvannsmagasinet øker deretter raskt;
- Innstrømning av elvevann kommer raskt tilbake til opprinnelig nivå ved flomkulminasjon;
- Utstrømning av grunnvann er betydelig større enn opprinnelig nivå ved fallende vannføring etter flomkulminasjon.

Innfiltrasjon av elvevann inn i grunnvannsmagasinet er en langsom prosess som er kontrollert av avsetningens evne til å slippe gjennom vann (hydraulisk ledningsevne) og gradienten mellom elva og grunnvannet. Vannbevegelsen inn i hovedakvifer på Rena er på omlag 1 m/dag. Dette betyr at elvevannet infiltreres kun i et veldig begrenset område (se ”bank storage” i figur 33c) langs elvebredden i løpet av en flomepisode. Infiltrasjon av elvevann er etter få dager balansert av utstrømning av grunnvannet som presser ut igjen det infiltrerte elvevannet. Det er kun oppstrøms (sone A) flommen bidrar til nydannelse av grunnvannet, siden det infiltrerte elvevannet etter slutten av flommen vil fortsette å bevege seg langsomt sørover inn i akviferen. Ut fra figur 37 ser man at periodene etter flom, hvor man registrerer en høyere utstrømning av grunnvann, varer lenger enn periodene hvor elvevannet infiltrerer seg i akviferen. Denne prosessen bidrar til å dempe flommene ved først å stoppe grunnvannstilsig til elva, og deretter ved å lagre en del elvevann. Dette vannvolumet frigjøres igjen ved slutten av flommen.

Når man analyserer flommen som oppstår i midten av juli (nr. 10 i figur 37), kan man anslå at opptil 30 000 m^3/dag elvevann infiltreres inn i grunnvannsmagasinet, samtidig med at ca. 8000 m^3/dag grunnvann ikke strømmer ut i Glomma. Denne prosessen bidrar derfor ved Rena til en reduksjon av vannføringen på 38 000 m^3/dag eller 0.44 m^3/s. I juli 2002 var vannføringen ved flomtopp på ca. 300 m^3/s, dvs. at lagringen av elvevann i grunnvannsmagasinet på Rena bidrar til å redusere flomvannføringen med ca. 0.15 %. Hvis man antar at det er, oppstrøms Rena, minst 100 elvesletter, langs Glomma og sideelvene, kan lagringen av elvevann i grunnvannsmagasiner langs elvene bidra til en

reduksjon av flomvannføring på omlag 15 %. Vi må imidlertid være forsiktig med slik ekstrapolasjon.

Oppbygging av tette flomverk langs elvene kan derfor ha større negative effekter enn positive effekter ved å redusere infiltrasjonsmuligheter av elvevann ved flom, og å redusere grunnvannstilsig til elva ved normal lav vannføring.

	Sone A	Sone B	Sone C	Sone D	Sone E	Total
Areal i m^2	40800	64200	51700	60500	43900	261100
m^3 i 219 dager	3887	93733	479126	648950	343007	1568705
m^3/dag	18	428	2188	2963	1566	7163
mm/dag	0.4	7	42	49	36	27
Antall dager	44	197	200	198	204	219

Tabell 19. Utstrømningsmengde av grunnvann i de ulike vannbalansesoner (se figur 18) og antall dager med utstrømning av grunnvann.

	Sone A	Sone B	Sone C	Sone D	Sone E	Total
Areal i m^2	40800	64200	51700	60500	43900	261100
m^3 i 219 dager	163930	61295	52482	88939	32041	398688
m^3/dag	749	280	240	406	146	1820
mm/dag	18	4	5	7	3	7
Antall dager	219	192	24	25	24	219

Tabell 20. Innstrømningsmengde av elvevann i de ulike vannbalansesoner og antall dager med innstrømning av elvevann.

	Sone A	Sone B	Sone C	Sone D	Sone E	Total
m^3 i 219 dager	-160043	32438	426644	560011	310966	1170016
m^3/dag	-731	148	1948	2557	1420	5342
mm/dag	-17.6	3	37	42	33	20

Tabell 21. Forskjell mellom utstrømnings- og innstrømningsmengde. Totalmengden gir en estimering av totalt grunnvannsbidrag til Glomma.

Tabellene 19, 20 og 21 gir en oversikt over vannbalanse i simuleringsperioden. Gjennomsnittlige utvekslingsmengder er angitt i m^3/dag. Verdiene er også angitt i mm/dag. Dette for bedre å kunne sammenligne tallene for de ulike vannbalansesonene (ulike arealer – se figur 18 og tabell 12).

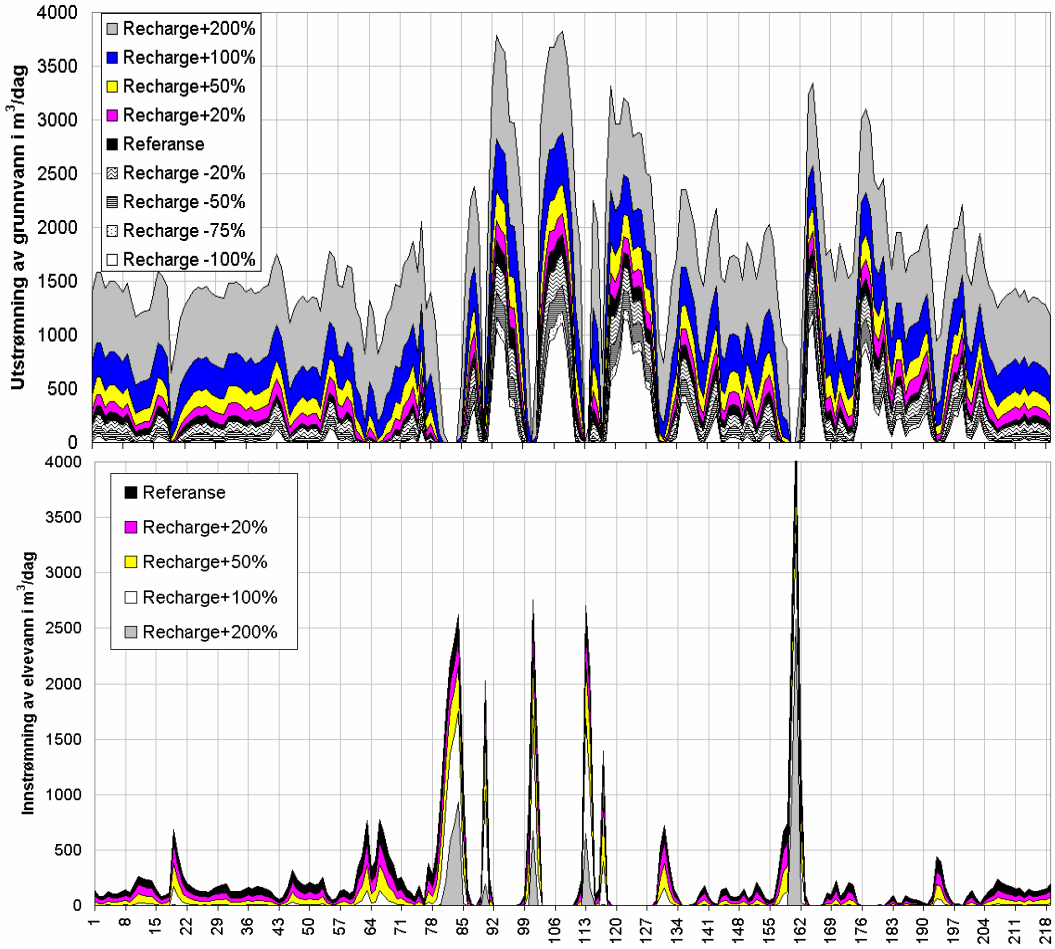
Utstrømning av grunnvann forekommer i de sørligste sonene, mens innstrømning av elvevann hovedsakelig finner plass i sone A. Tabell 21 indikerer at vannbalansen for hele simuleringsperioden (februar-september) er positiv for grunnvanntilsig. Det er et tilskudd av grunnvannstilsig på ca. 5340 m^3/dag eller 20 mm/dag. Tilskuddet av grunnvannstilsig representerer mindre enn 0.03 % av vannføringen i denne perioden (antatt å være i gjennomsnitt ca. 200 m^3/s). Tilsigsområdet til elvesletta på Rena er på ca. 5 km^2, mens tilsigsområdet til Glomma oppstrøms Rena er på ca. 10 200 km^2. Ut fra disse tallene, kan man estimere at grunnvannstilsiget til Glomma-vassdraget oppstrøms Rena kan representere over 60 % av gjennomsnittlig vannføring i perioden februar-september 2002[4].

Det er flere problemer som gjør at det er vanskelig å bruke resultatene fra modellen for ekstrapolasjon i hele vassdraget mht. estimering av grunnvannsbidrag og dempningseffekt. Modellområdet ligger ved samløp mellom Rena og Glomma. Glomma oppstrøms Rena er delvis regulert. De hydrogeologiske forholdene er ikke homogene i hele nedbørfeltet. Derfor må disse tallene i utgangspunktet betraktes som veldig usikre. De gir imidlertid et godt begrep om hvor viktig grunnvannsmagasinene langs vassdragene kan være for elvevannskvantitet, og dermed også for elvevannskvalitet.

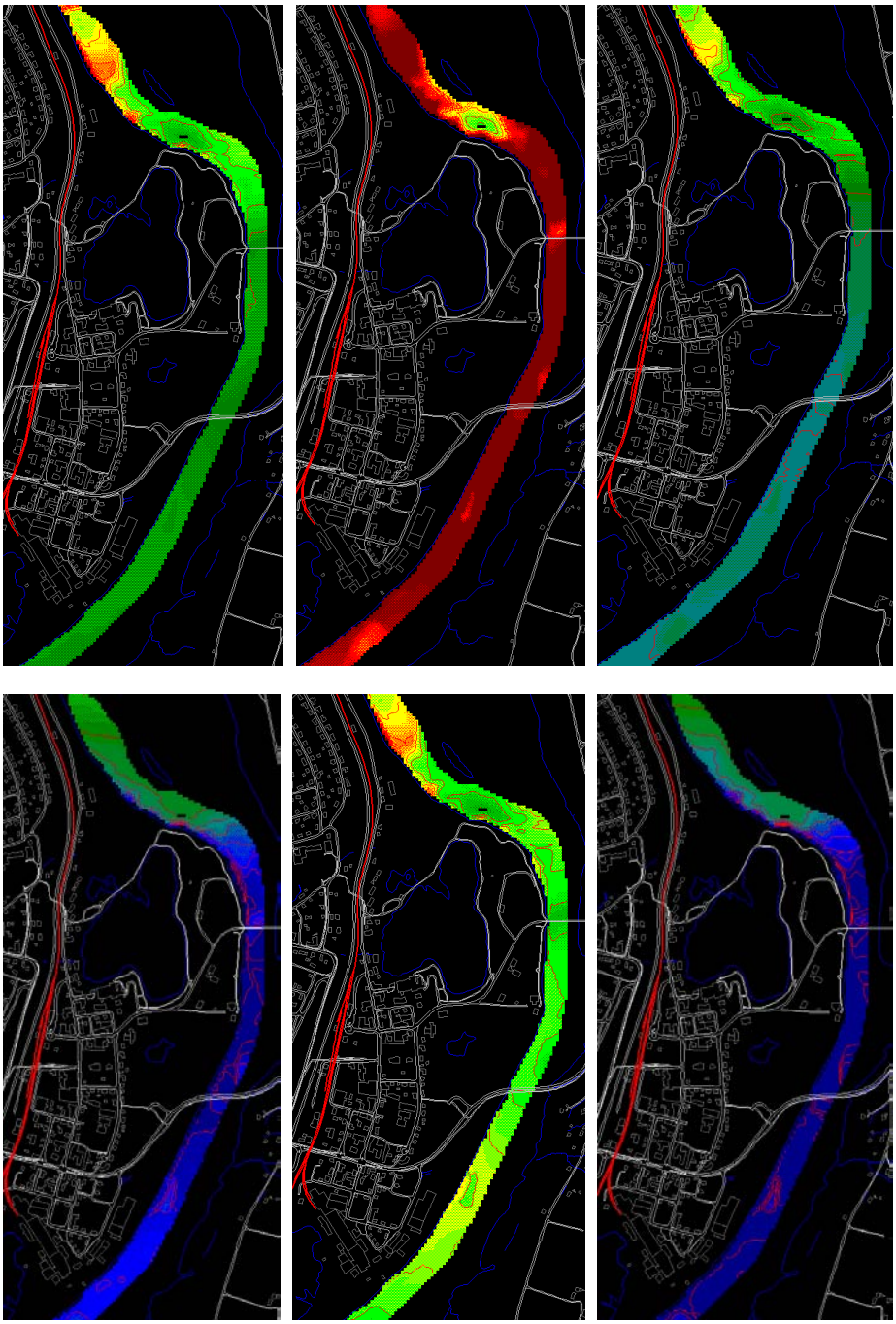
[4] Dette bør sammenlignes med resultatene fra analyser av grunnvannsbidrag vha. resesjonskurver.

5.2. Effekt av endringer i grunnvannsdannelse

Vi analyserer her effektene av endring i grunnvannsdannelse på platået og i elvesletta, som selv er en funksjon av effektiv nedbør, på vannutveksling mellom grunnvann og elvevann. Figur 39 viser effekten på total daglig vannutvekslingsmengde i sone B, mens figur 40 viser utvekslingsmengde ved normal vannføring, flom og rett etter flom under Glomma i hele modellområdet. I figurene 41 til 44 presenteres effekten i forhold til referansetilstand (kalibrert modell) i de 5 ulike vannbalansesoner (endringer i utvekslingsmengde, rom- og tidsfordelingen).



Figur 39. Utstrømning av grunnvann (øverst), og innstrømning av elvevann (nederst), ved ulike fornyelsesmengder av grunnvann ("Recharge") i sone B (nord for Prestsjøen) angitt i m^3/dag. X-aksen representer dagsnummer (01.02 til 07.09.2002). En vannmengde på 2000 m^3/dag tilsvarer i sone B ca. 8 mm/dag. Referanse tilsvarer utvekslingsmengdene beregnet med den kalibrerte modellen (2002).

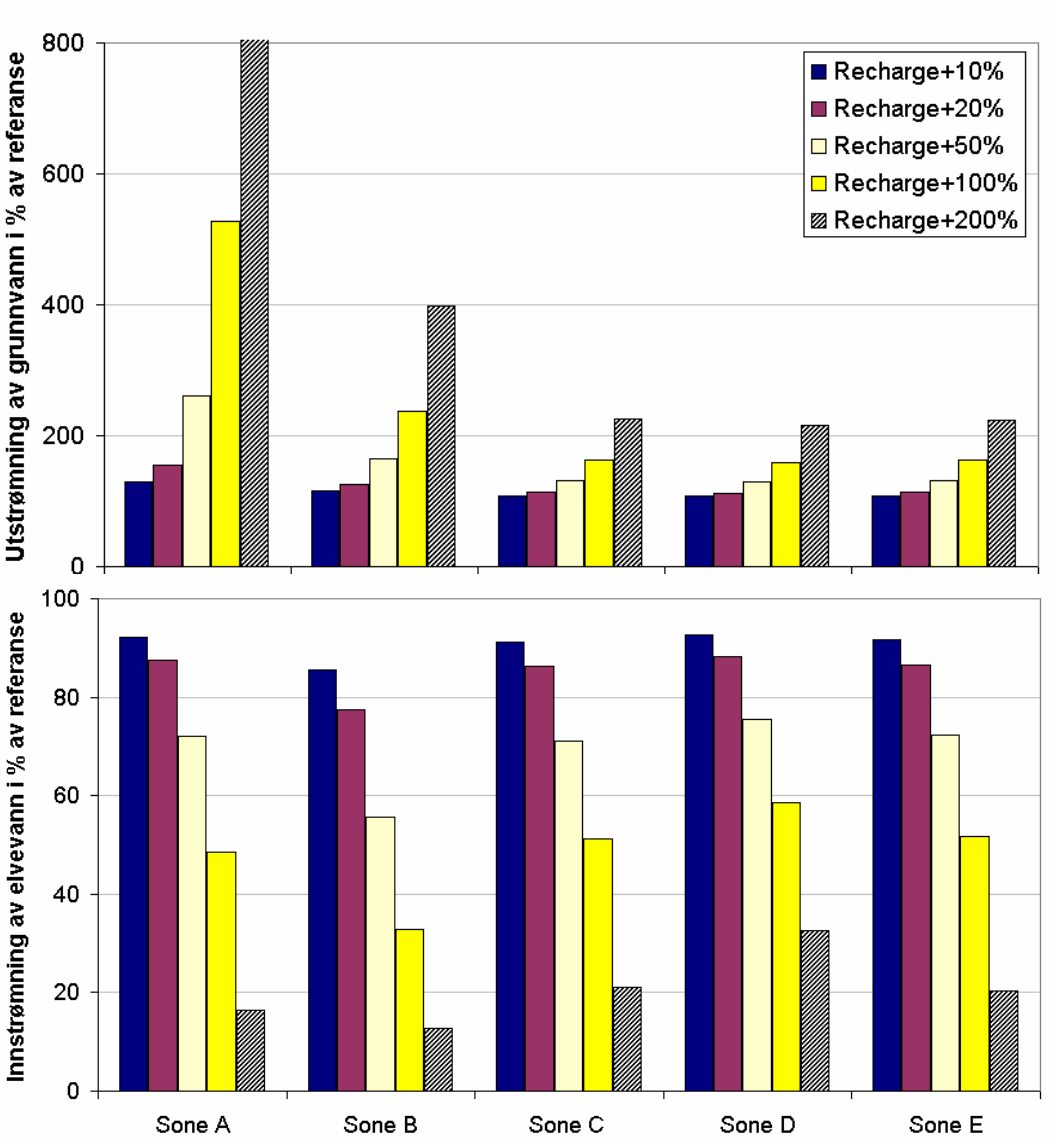


Normal vannføring (7. juli) **Flom (10. juli)** **Etter flom (13. juli)**

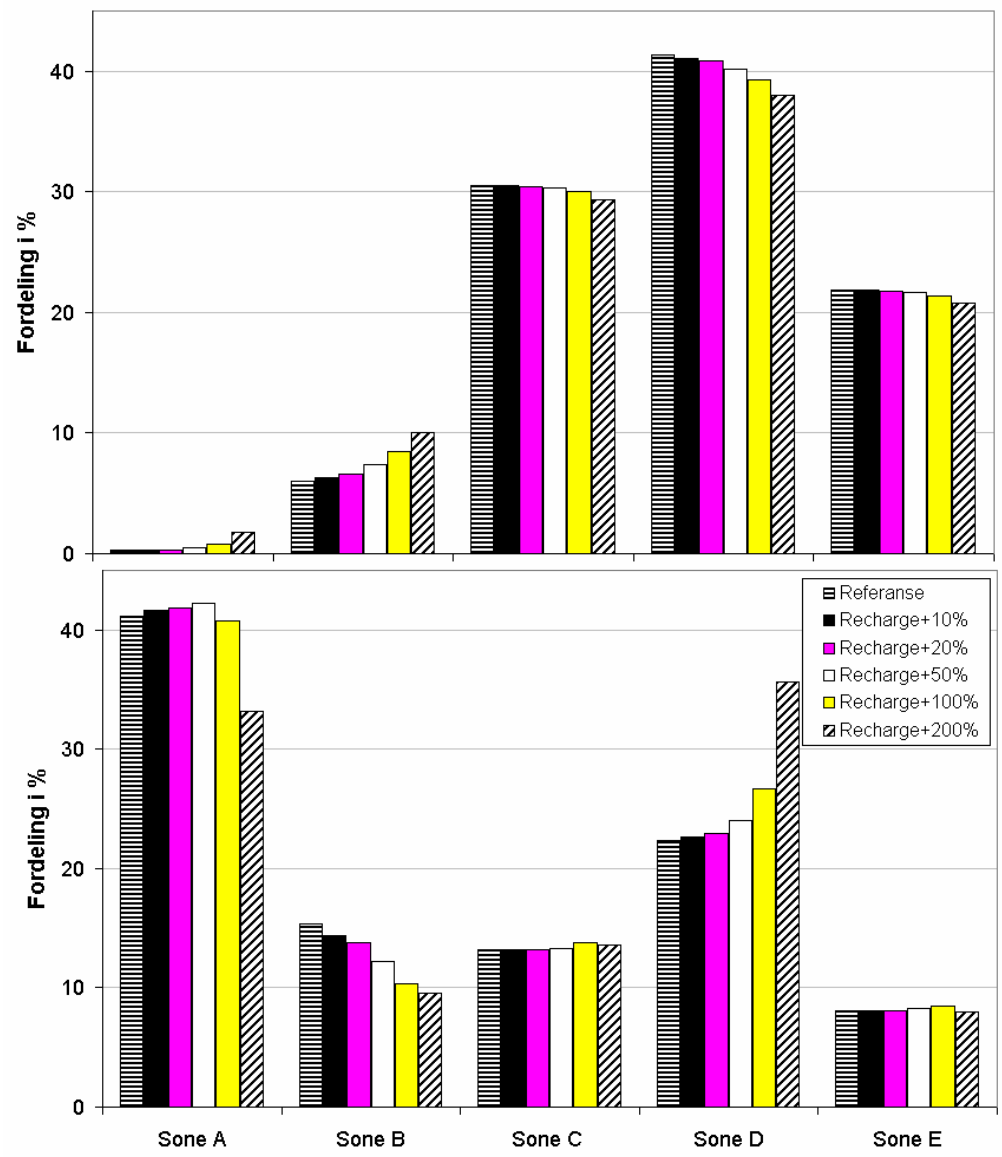
mm/dag	**>20**	**15**	**10**	**5**	**0**	**5**	**10**	**>15**
	Innstrømning av elvevann					**Utstrømning av grunnvann**		

Figur 40. Utvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannet angitt i mm/dag. Uten grunnvannsdannelse i platået (øverst), og med 200 % høyere grunnvannsdannelse (nederst).

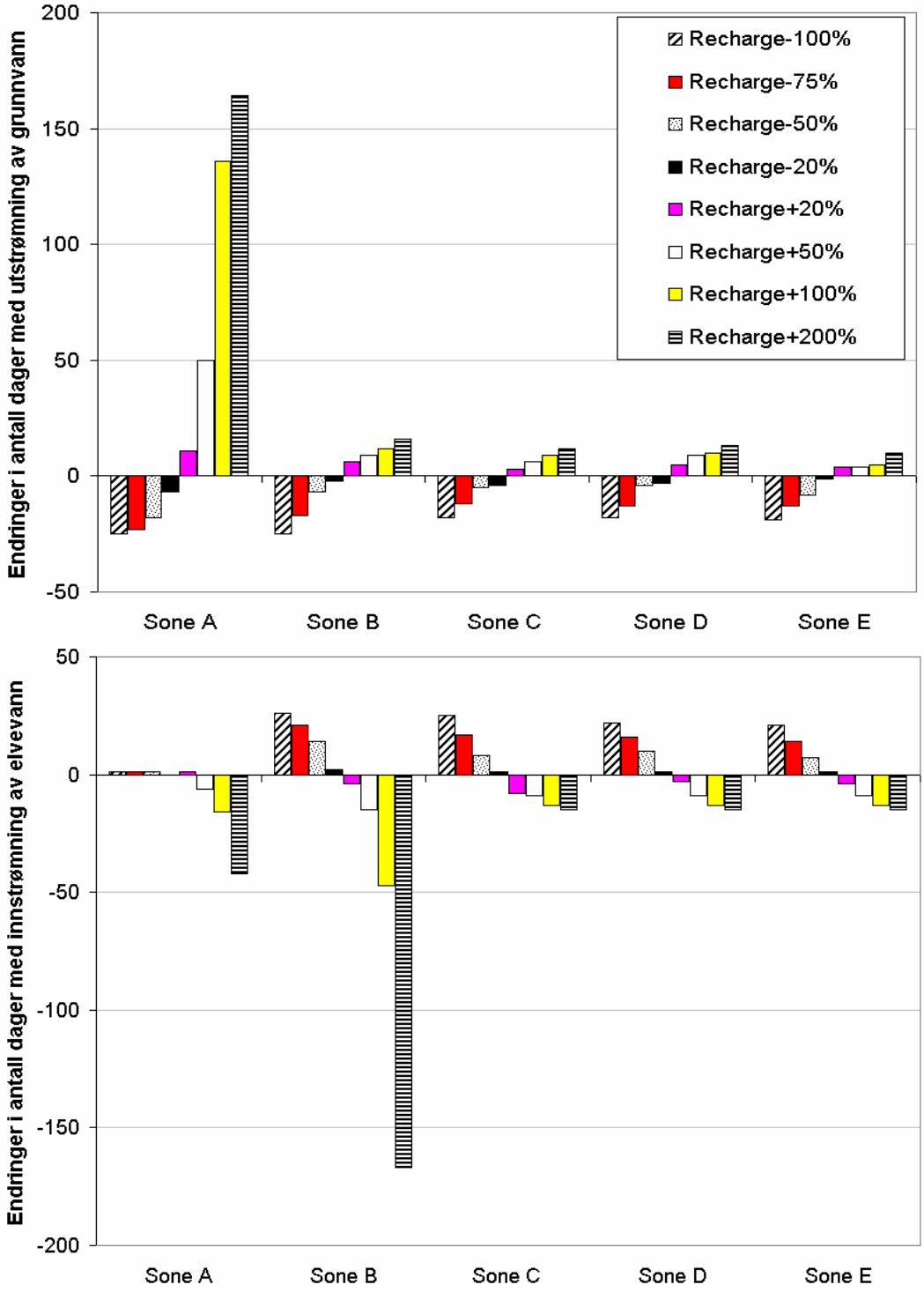
Med ”Recharge+100%” menes en grunnvannsdannelse (effektiv nedbør) både på platået og i elvesletta som er to ganger større enn ved referansen (kalibrert modell – se tabell 12), mens med ”Recharge-100%” menes at grunnvannstilsig fra platået er null, og at det er kun normal infiltrasjon fra terrengoverflaten i elvesletta.



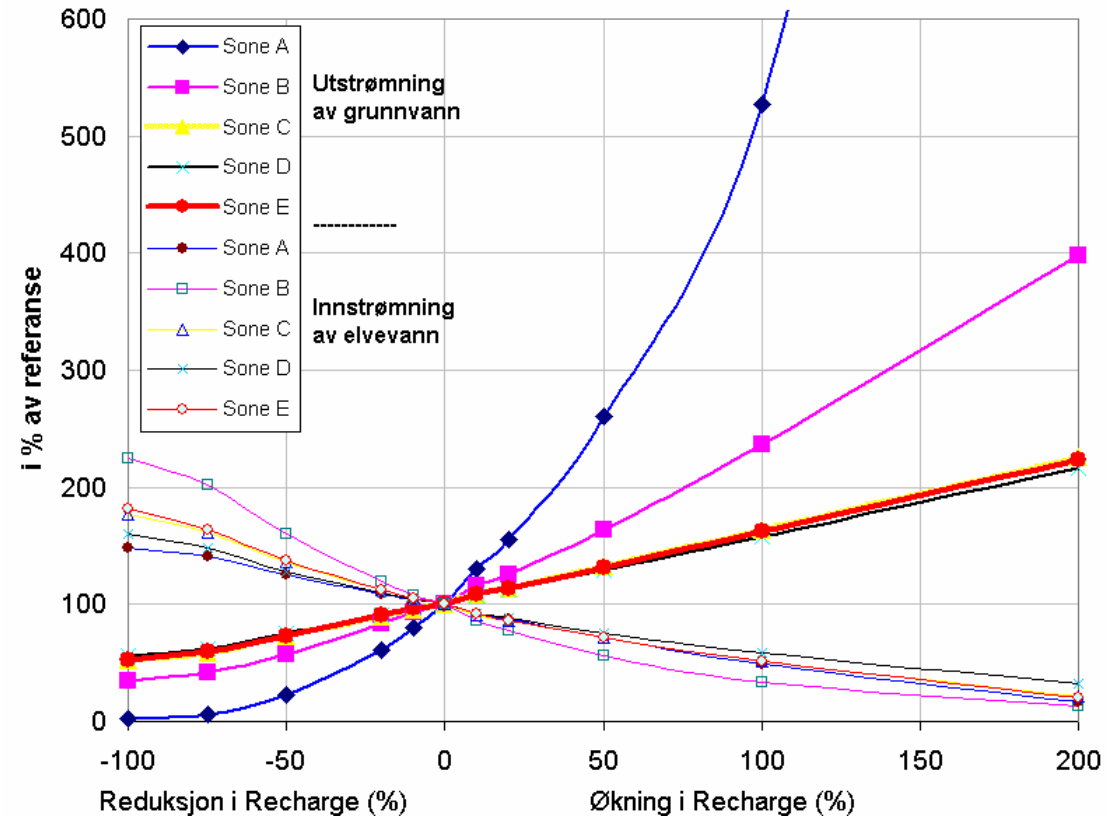
Figur 41. Total utstrømning av grunnvann (øverst), og innstrømning av elvevann (nederst), ved ulike grunnvannsdannelser (”Recharge”) i de ulike vannbalansesoner angitt i % av referanse. Referanse tilsvarer utvekslingsmengdene beregnet med den kalibrerte modellen (2002).



Figur 42. Effekt av økning av grunnvannsdannelse ("Recharge") på fordeling av vannutvekslingsmengder. Utstrømning av grunnvann (øverst), og innstrømning av elvevann (nederst), i de ulike vannbalansesoner.



Figur 43. Effekt av endring i grunnvannsdannelse ("Recharge") på antall dager med utstrømning av grunnvann (øverst) og innstrømning av elvevann (nederst). Negative verdier indikerer en reduksjon av antall dager.



Figur 44. Effekt av endring i grunnvannsdannelse ("Recharge") på vannutvekslingsmengder i de ulike vannbalansesoner.

Endringer i grunnvannsdannelse har stor betydning for grunnvannstilsig fra platået. Videre har dette betydelig effekt på utvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet (figur 39-44). De største endringene skjer i den nordligste delen av elvesletta (sone A og B). En endring i grunnvannsdannelse på 200 % (4 ganger større enn referanse) fører til at utstrømningsmengder av grunnvannet blir over 800 % i sone A, 400 % i sone B, og ca. 200 % i de andre sonene av referansemengder. Samtidig blir innstrømningsmengder av elvevann mellom 20 og 30 % av referanse. Relasjonen mellom grunnvannsdannelse og vannutvekslingsmengde er eksponentiell (figur 44).

Det skjer en liten omfordeling i rom av utvekslingsmengder (figur 42). Større grunnvannsdannelse fører f. eks. til større utstrømningsmengder av grunnvann i de to nordligste sonene (A og B), men lavere mengder i sonene C, D og E. En sterk økning i grunnvannsdannelse gjør at innstrømningsmengder av elvevann reduseres i de nordligste sonene, men øker i sone D.

Det er først og fremst i de nordligste sonene at endringer i grunnvannsdannelse har betydning for antall dager med utstrømning av grunnvann/innstrømning av elvevann (figur 43). En økning på 200 % grunnvannsdannelse reduserer antall dager med innstrømning av elvevann med ca. 170 dager i sone B, samtidig med at antall dager med utstrømning av grunnvann øker med 170 dager i sone A.

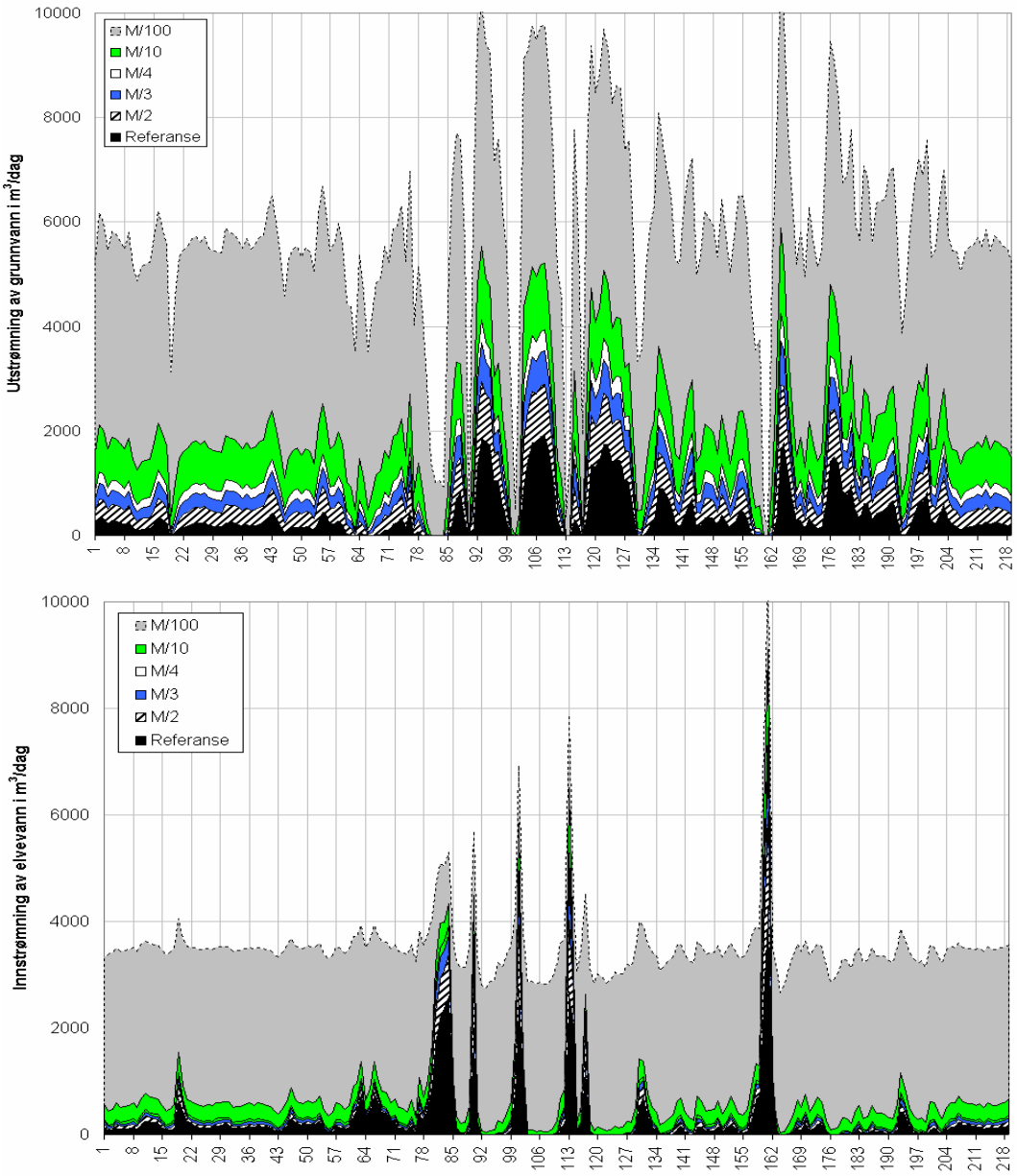
Økning av grunnvannsdannelse fører til kortere oppholdstid for vannet og høyere vannhastighet i grunnvannsmagasinet. Det er estimert at en økning på 200 % av grunnvannsdannelse fører til at grunnvannsbevegelsen inn i hovedakviferen (lag 3) på Rena, kan øke fra ca. 1 m/dag til 3 m/dag. I tillegg og pga. endringer i strømningsbilder vil grunnvannet ha en kortere vei til utstrømningsområder inn i Glomma (retning vest-øst).

5.3. Effekt av endringer i egenskapene til bunnsedimenter

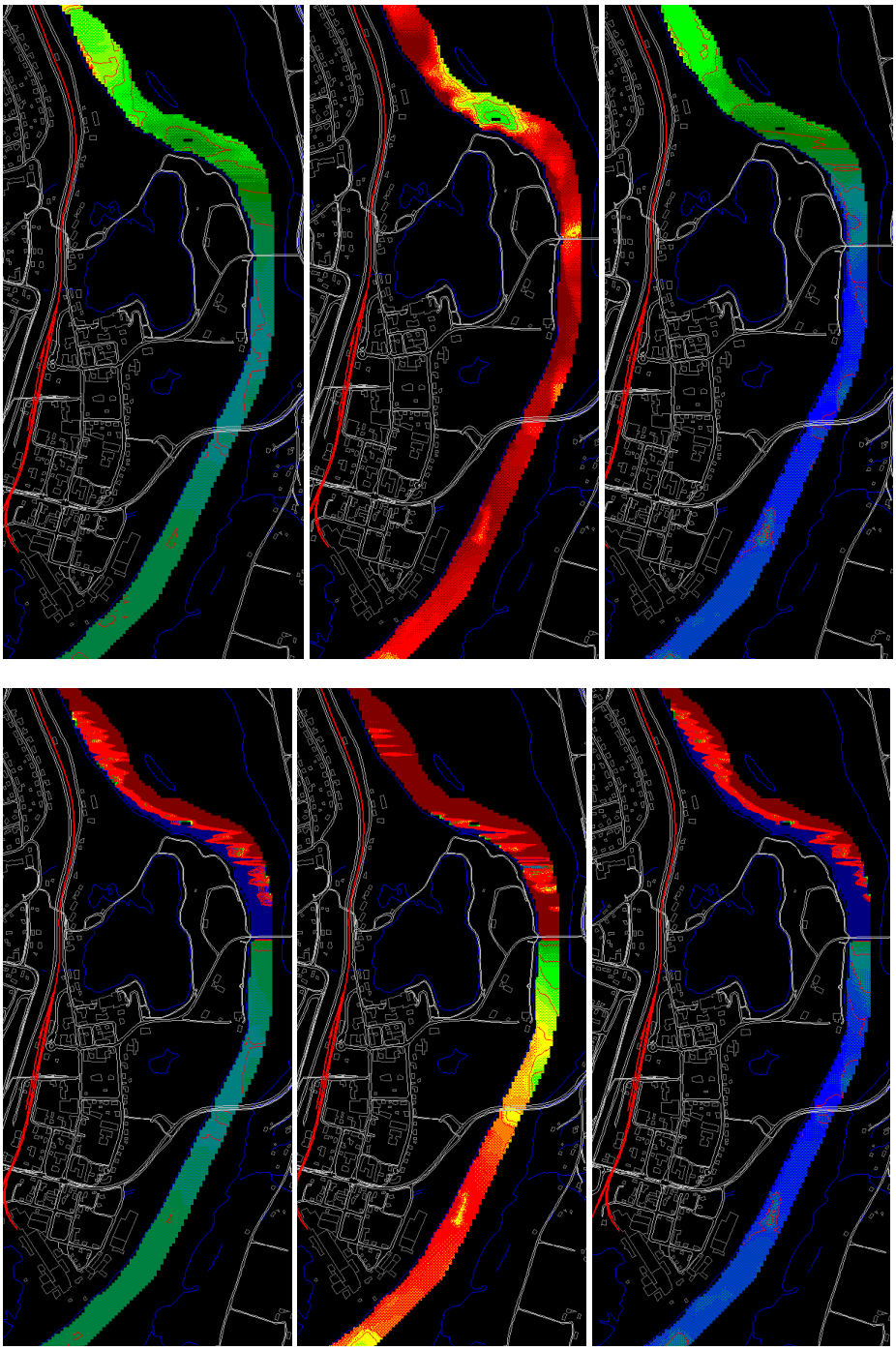
Sedimentasjonsforholdene i Glomma er sterkt bestemmende for hvor avhengig grunnvannsmagasinet i Rena er av elvas vannstand. Egenskaper til elvas bunnsedimenter er avgjørende når det gjelder grunnvannets oppholdstid og kvalitet. Massetransport og erosjonsprosesser kontrollerer mektigheten og sammensetningen til bunnsedimenter og dermed infiltrasjonsgraden. Ved lav vannføring etter større flommer vil sedimentasjon kunne redusere permeabiliteten kraftig og dermed infiltrasjonen av vann fra eller til akviferen. Høyere sedimentasjon kan bety større mektighet av bunnsedimenter og/eller avsetning av finere partikler (lavere permeabilitet). Vannutvekslingsmengder er en funksjon av gradient mellom elva og grunnvannet, samt permeabilitet og mektigheten til elvas bunnsedimenter. Lavere mektighet har samme effekt som høyere permeabilitet. En reduksjon av mektigheten til bunnsedimenter fra 10 til 1 m har, i modellen, samme effekt som en økning av permeabilitet fra 10^{-3} til 10^{-2} m/s[5]. Dette gjør at man kan analysere samtidig effekt av endring i mektigheten og permeabilitet til sedimenter. Effekt av sedimentasjon i Glomma analyseres derfor i utgangspunktet ved å beregne effekt av endring i permeabilitet til bunnsedimenter (Ks i lag 2). Endringene utføres kun i den nordligste delen av Glomma (fra Glomma bru og oppover: vannbalansesoner A og B). Det er i disse sonene det er registrert største dyp av fluviale sedimenter bestående av siltig sand (se figur 3, og resultatene fra georadarundersøkelser i rapport 2). Disse sedimentene antas å være avsatt relativt nylig, etter de forskjellige vassdragsinngrepene som fant sted i Glomma (regulering, bygging av flomverk, etter 1995-flommen; se rapport 2).

Endringer i egenskapene til bunnsedimenter (mektighet og permeabilitet) har stor betydning for utvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet. De største effektene oppstår i den nordligste delen av elvesletta (sone A og B) hvor egenskapene er endret. Figur 45 viser effekten på total daglig vannutvekslingsmengder i sone B, mens figur 46 viser utvekslingsmengder ved normal vannføring, flom og rett etter flom under Glomma i hele modellområdet. I figurene 47 til 49 presenteres konsekvenser av endringer i egenskaper til bunnsedimenter i forhold til referansetilstand i de 5 ulike vannbalansesonene (endringer i utvekslingsmengder, rom- og tidsfordelingen).

[5] I Renas modell simuleres vannutvekslingen som en lekkasje gjennom bunnsedimentene (lag 2).



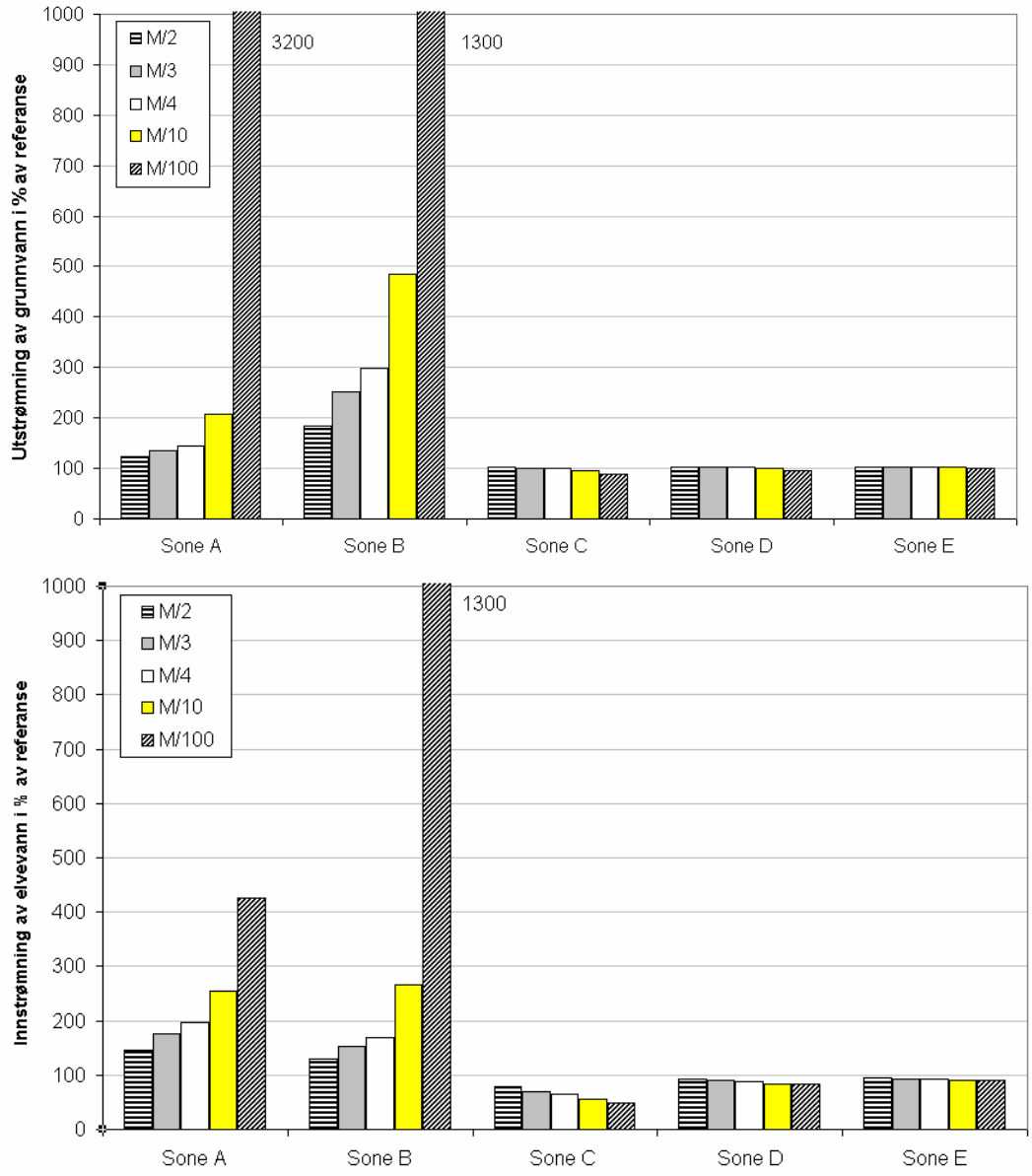
Figur 45. Utstrømningsmengder av grunnvann (øverst) og innstrømningsmengder av elvevann (nederst) angitt i m^3/dag, ved ulike egenskaper til bunnsedimenter i sone B (nord for Prestsjøen). X-aksen representer dagsnummer (01.02 til 07.09.2002). En vannmengde på 2000 m^3/dag tilsvarer i sone B ca. 8 mm/dag. Referanse tilsvarer utvekslingsmengdene beregnet med den kalibrerte modellen (2002). "M/2" betyr at mektigheten til bunnsedimenter under Glomma i den nordligste delen av modellen er 2 ganger tynnere, eller at bunnsedimentenes hydrauliske ledningsevne er 2 ganger større (se fotnote nr.5).



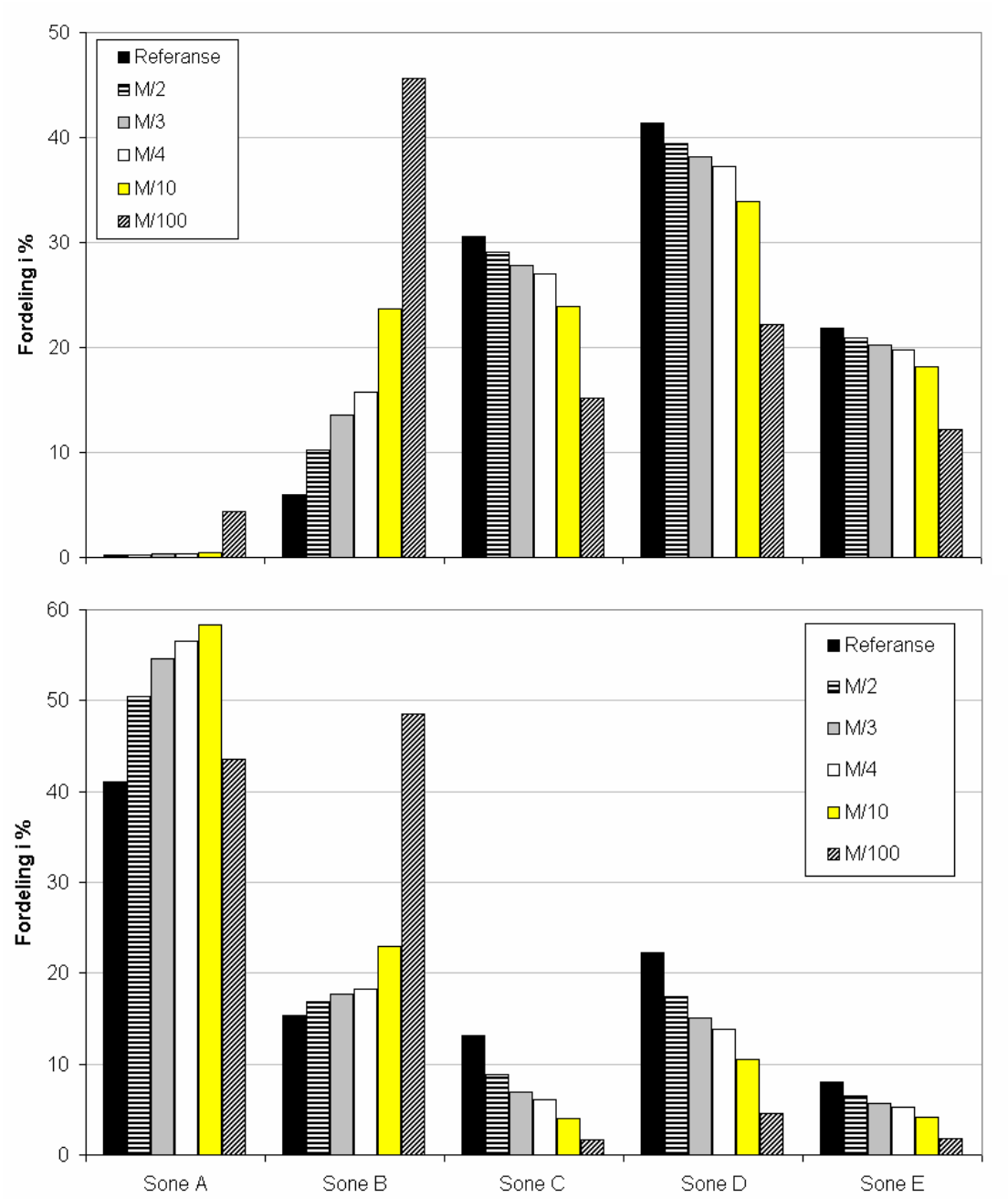
Normal vannføring (7. juli) **Flom (10. juli)** **Etter flom (13. juli)**

mm/dag	**>20**	**15**	**10**	**5**	**0**	**5**	**10**	**>15**
	Innstrømning av elvevann					**Utstrømning av grunnvann**		

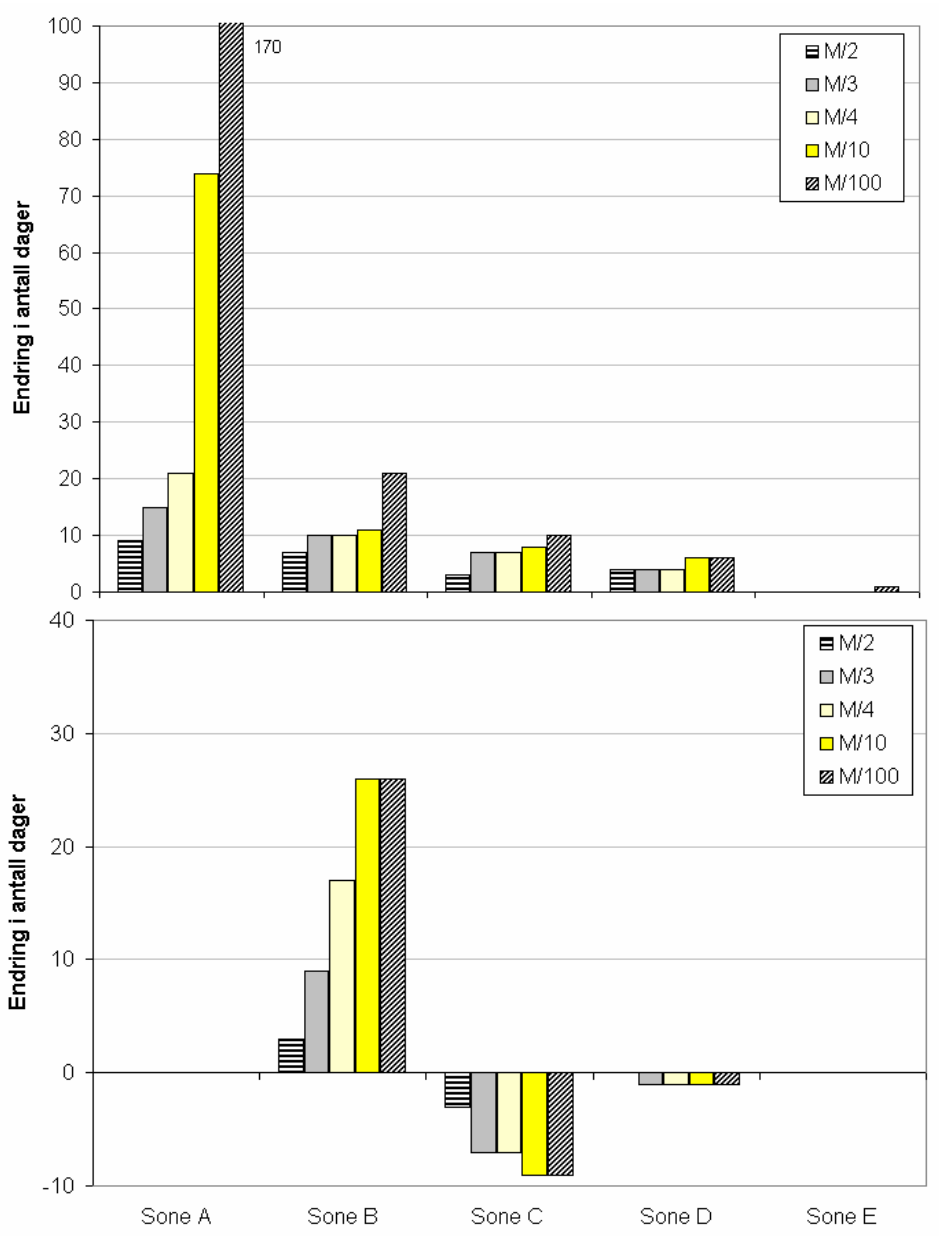
Figur 46. Utvekslingsmengde mellom Glomma og grunnvannsmagasinet angitt i mm/dag. Referanse: Kalibrert modell (øverst), og 2 ganger tynnere mektighet (nederst).



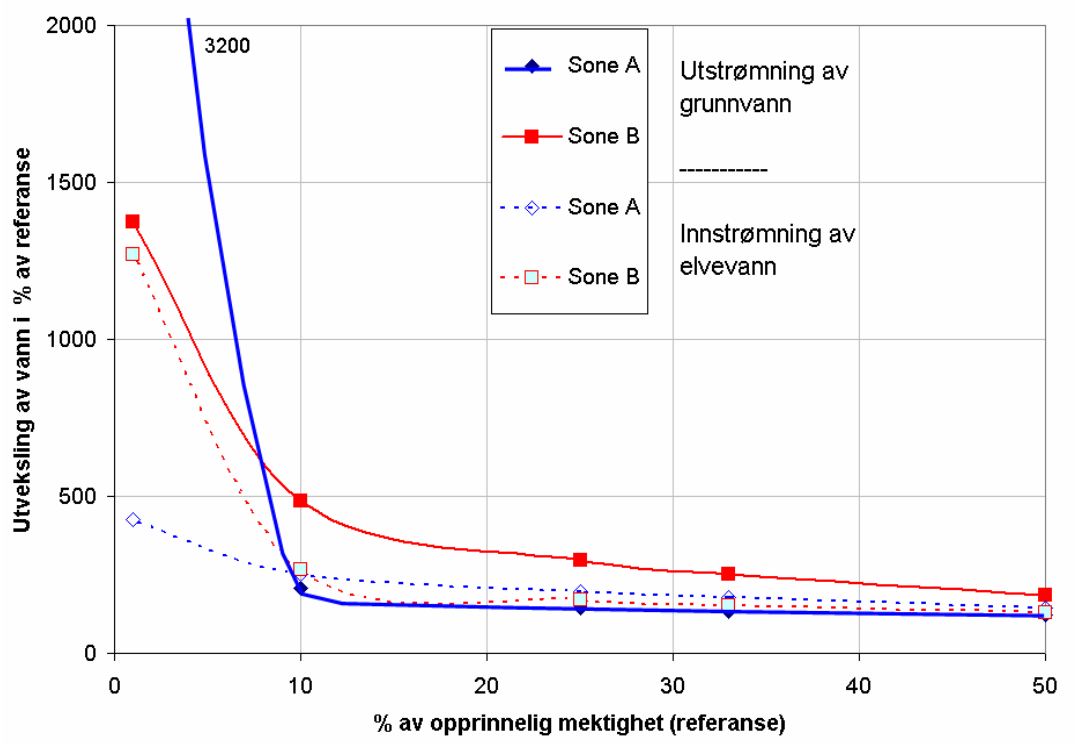
Figur 47. Totale utstrømningsmengder av grunnvann (øverst) og innstrømningsmengder av elvevann (nederst) ved ulike egenskaper til bunnsedimenter. Utvekslingsmengdene angis i de ulike vannbalansesonene i % av referanse (kalibrert modell). "M/2" betyr at mektigheten til bunnsedimenter under Glomma i den nordligste delen av modellen er 2 ganger tynnere, eller at bunnsedimentenes hydrauliske ledningsevne er 2 ganger større.



Figur 48. Effekt av endringer i egenskapene til bunnsedimenter på fordeling av vannutvekslingsmengder. Utstrømning av grunnvann (øverst) og innstrømning av elvevann (nederst). "M/2" betyr at mektigheten til bunnsedimenter under Glomma i den nordligste delen av modellen er 2 ganger tynnere, eller at bunnsedimentenes hydrauliske ledningsevne er 2 ganger større.



Figur 49. Effekt av endring i egenskapene til bunnsedimenter på antall dager med utstrømning av grunnvann (øverst) og innstrømning av elvevann (nederst). Negative verdier indikerer en reduksjon av antall dager i forhold til referanse (kalibrert modell). "M/2" betyr at mektigheten til bunnsedimenter under Glomma i den nordligste delen av modellen er 2 ganger tynnere, eller at bunnsedimentenes hydrauliske ledningsevne er 2 ganger større.



Figur 50. Effekt av endring i bunnsedimenters mektighet på vannutvekslingsmengder i de to nordligste vannbalansesoner A og B. Utvekslingsmengdene angis i % av referanse (kalibrert modell). 50 % av opprinnelig mektighet betyr at mektigheten til bunnsedimenter under Glomma i den nordligste delen av modellen er 2 ganger tynnere, eller at bunnsedimentenes hydrauliske ledningsevne er 2 ganger større.

En 10 ganger lavere mektighet, eller 10 ganger større permeabilitet, fører til at utstrømning av grunnvannet blir over 200 % av referansemengder i sone A og ca. 500 % i sone B. Samtidig blir innstrømningsmengden av elvevann 250 % av referanse i sonene A og B, og mindre enn 100 % i de andre sonene (figur 50).

Lavere mektighet, eller høyere permeabilitet til bunnsedimenter, i sone A og B, fører til en omfordeling av vannutvekslingsmengde:

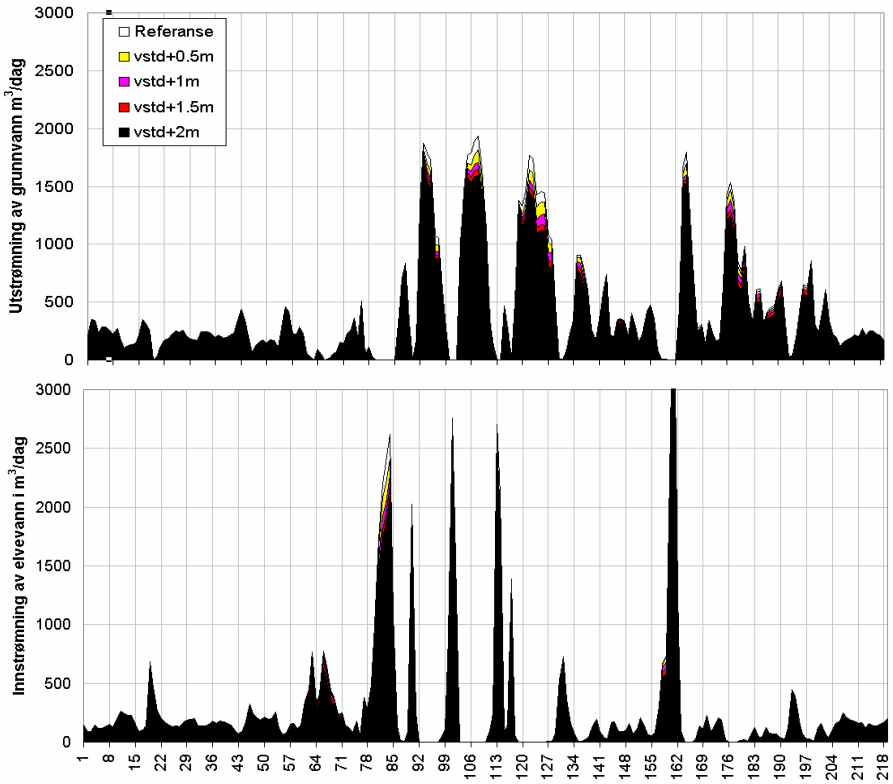
- større utstrømning av grunnvann i sone B, men lavere i sonene C, D og E;
- større innstrømning av elvevann i sonene A og B, men lavere i sonene C, D og E;
- ved kraftige endringer (M/100), følges økningen i ustrømningsmengde av grunnvann av en reduksjon i innstrømningsmengde av elvevann i sone A.

Endringer i egenskapene til bunnsedimenter har også betydning for antall dager med utstrømning av grunnvann/innstrømning av elvevann (figur 49). Det er spesielt i sonene A, B, C hvor endringene er betydelig. En 10 ganger tynnere mektighet, eller 10 ganger større permeabilitet, gjør at det blir over 70, 10 og 8 flere dager for utstrømning av grunnvann henholdsvis i sonene A, B og C. Samtidig er antall dager med innstrømning av elvevann økt med 25 dager i sone B og minsket med 8 dager i sone C.

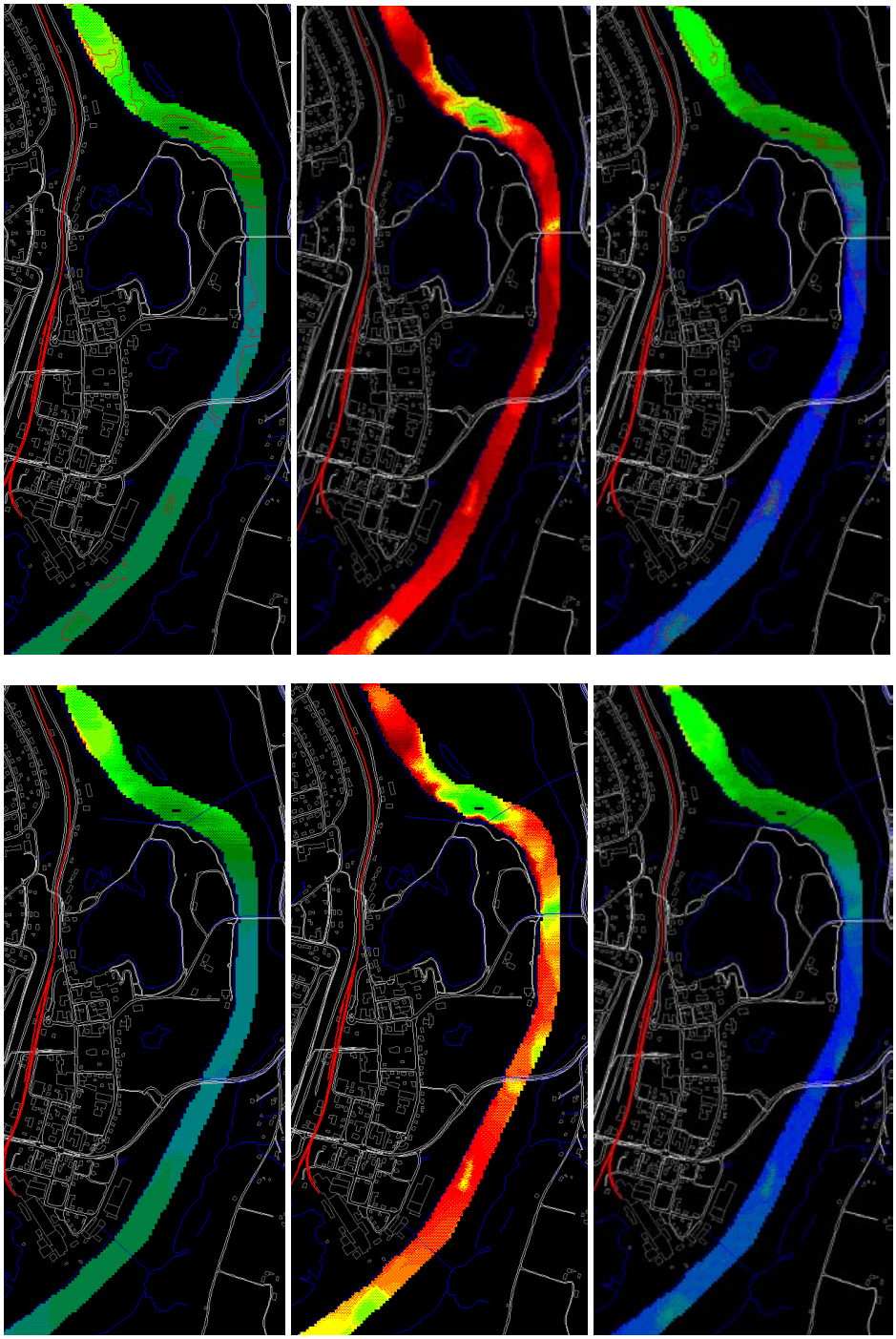
Lavere mektighet eller høyere permeabilitet av bunnsedimenter fører til større vannbevegelser i grunnvannsmagasinet, og dermed lavere vannoppholdstid. En 2 ganger lavere mektighet, eller 2 ganger høyere permeabilitet, fører til at grunnvannbevegelsen inn i den nordligste delen av hovedakviferen (lag 3), kan øke fra ca. 1 m/dag til 2.5 m/dag.

5.4. Effekt av endring i elvevannstand

Vi analyserer her effekter av endring i elvevannstand på vannutveksling mellom grunnvannsmagasinet og Glomma. Dette gjøres ved å kjøre modellen i simuleringsperioden (01.02 til 07.09.2002) ved ulik vannstand i Glomma (observert vannstand +0.5, 1.0, 1.5 og 2.0 m) og analysere effekten på vannutvekslingsmengde i de fem vannbalansesonene som vi definerte tidligere (figur 18). Kun en økning av vannstand i Glomma er testet pga. problemer med modellkonvergens ved lavvann (trykkverdiene faller under bunnen til enkelte celler). Denne analysen var mest tidkrevende fordi endringer i vannstand i Glomma må utføres manuelt i Modflow. Man må først utarbeide en excel-fil med de nye vannstandsdataene på de ulike nivellerte punktene (figur 11) og importere data på nytt i Modflow for alle disse punktene.



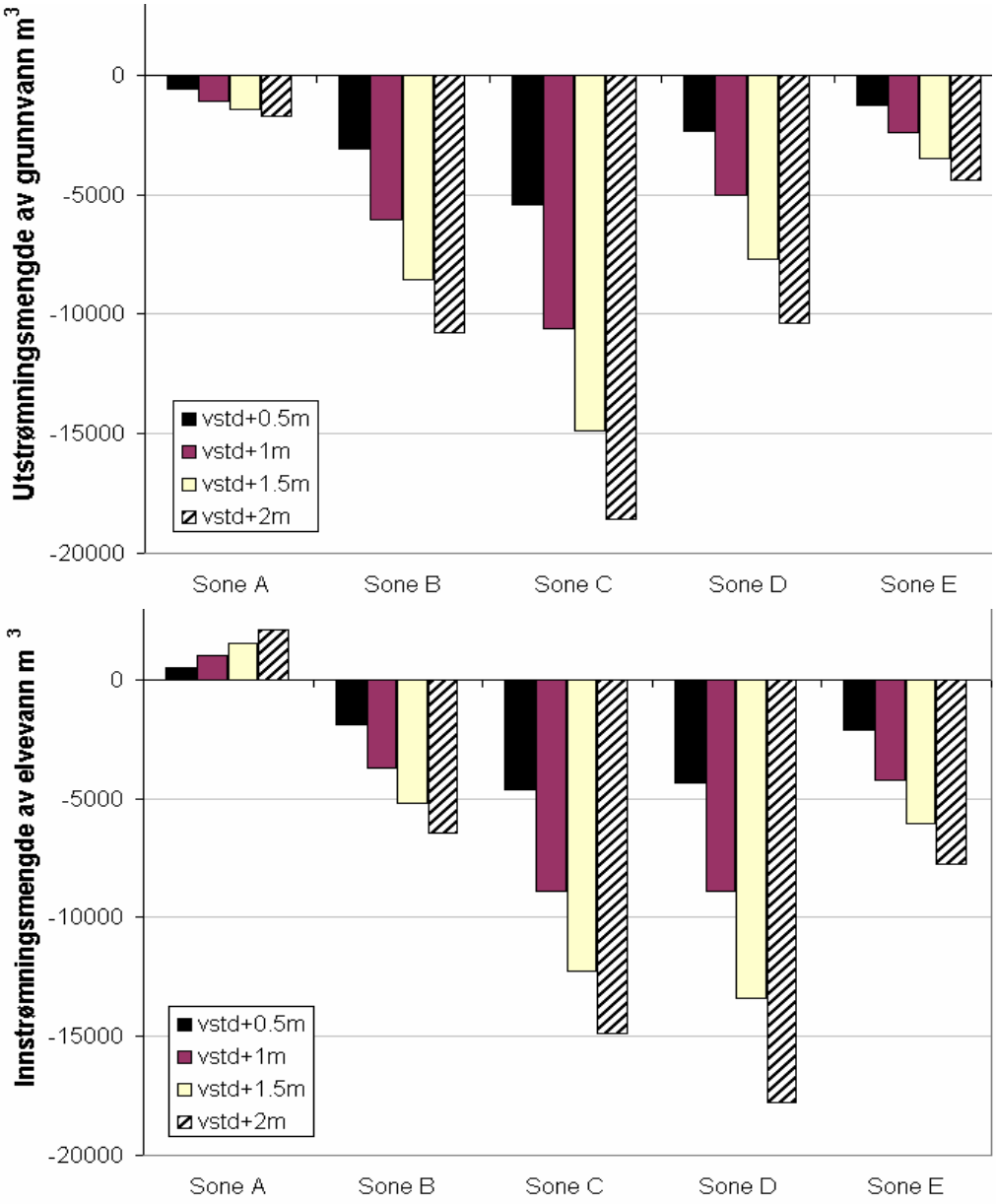
Figur 51. Vannutvekslingsmengder i den øverste delen av elvesletta (sone B). Utstrømningsmengde av grunnvann (øverst) og innstrømningsmengde av elvevann (nederst) angitt i m^3/dag, ved ulik elvevannstand. X-aksen representer dagsnummer (01.02 til 07.09.2002). En vannmengde på 2000 m^3/dag tilsvarer i sone B ca. 8 mm/dag. Referanse tilsvarer utvekslingsmengdene beregnet med den kalibrerte modellen (2002).



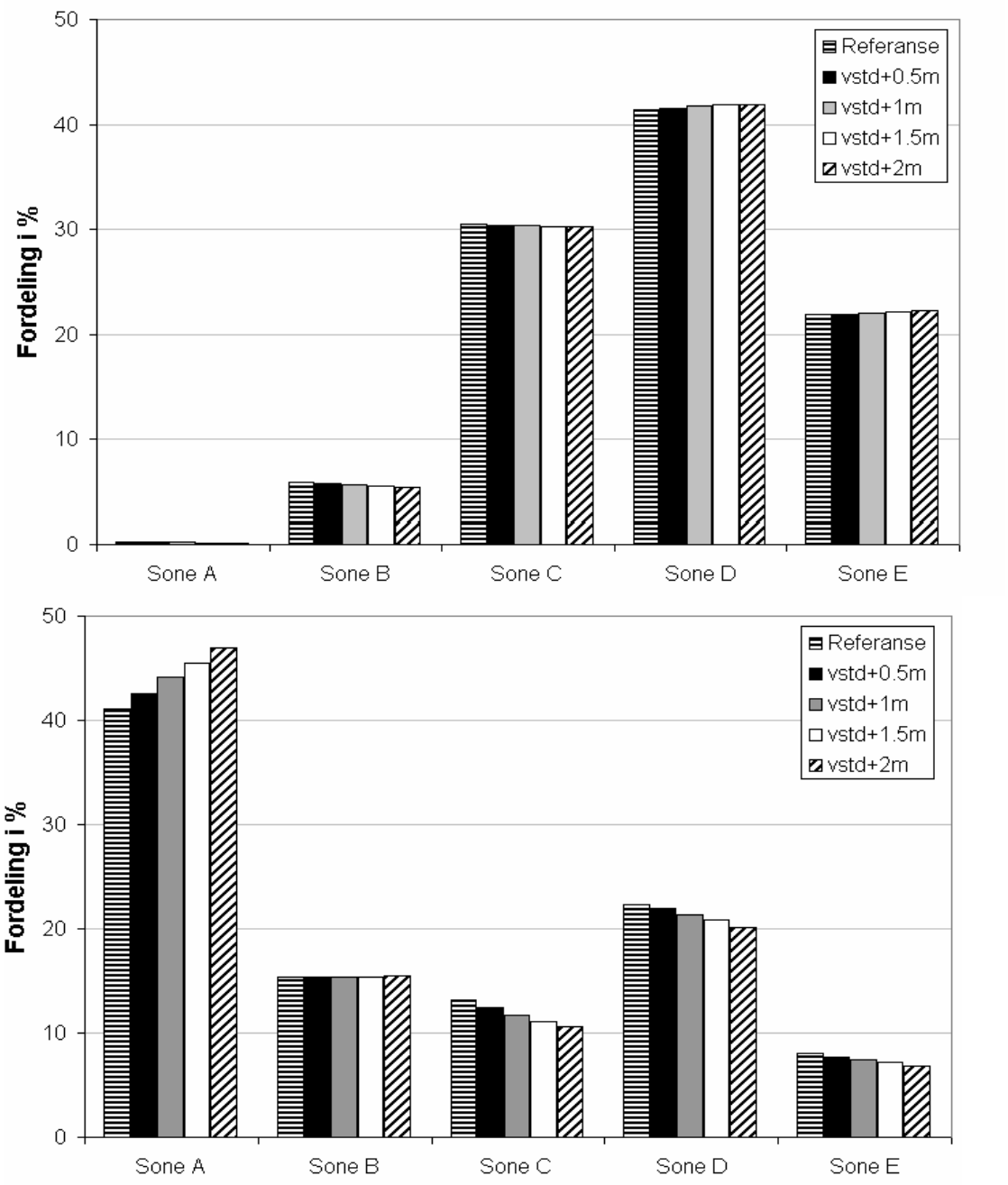
Normal vannføring (7. juli) **Flom (10. juli)** **Etter flom (13. juli)**

mm/dag	**>20**	**15**	**10**	**5**	**0**	**5**	**10**	**>15**
	Innstrømning av elvevann					**Utstrømning av grunnvann**		

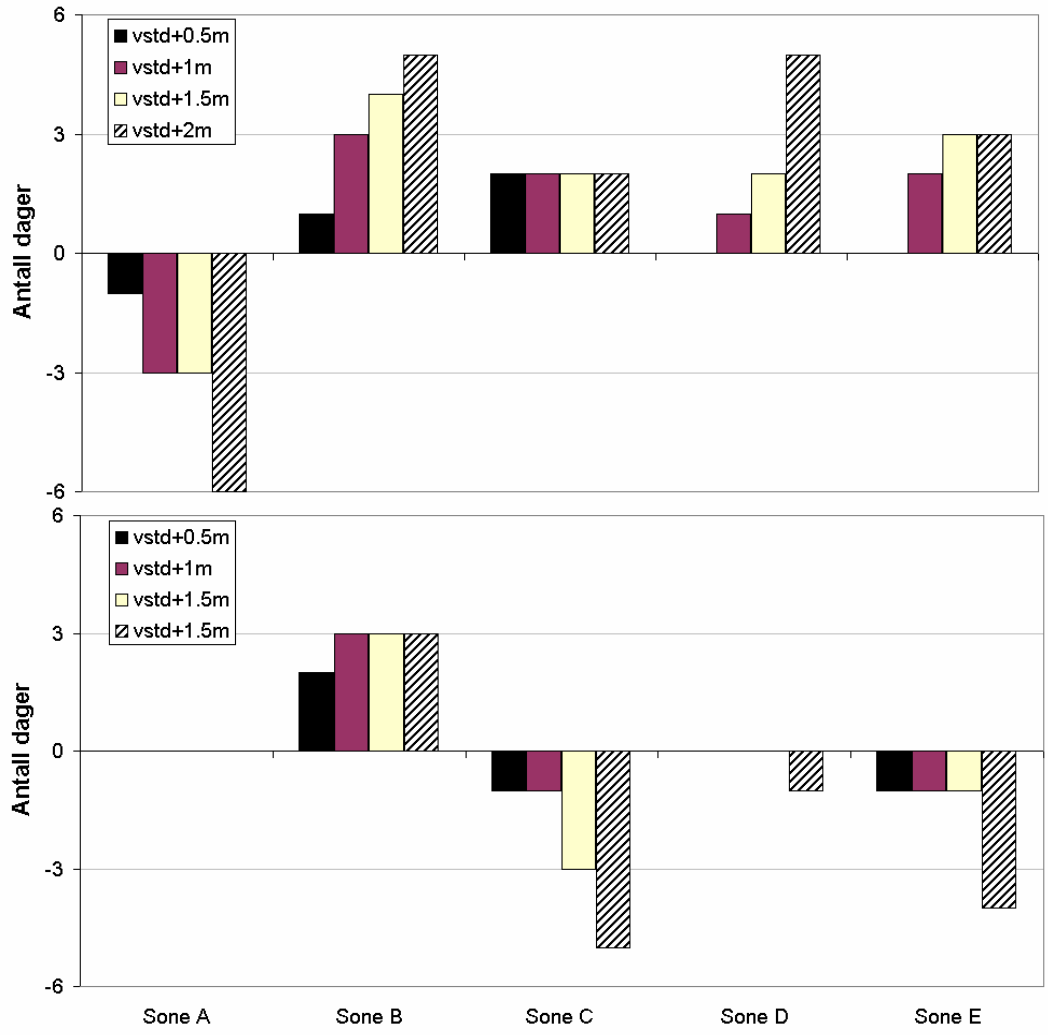
Figur 52. Utvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet angitt i mm/dag. Referanse: Kalibrert modell (øverst), og 2 m høyere elvevannstand (nederst).



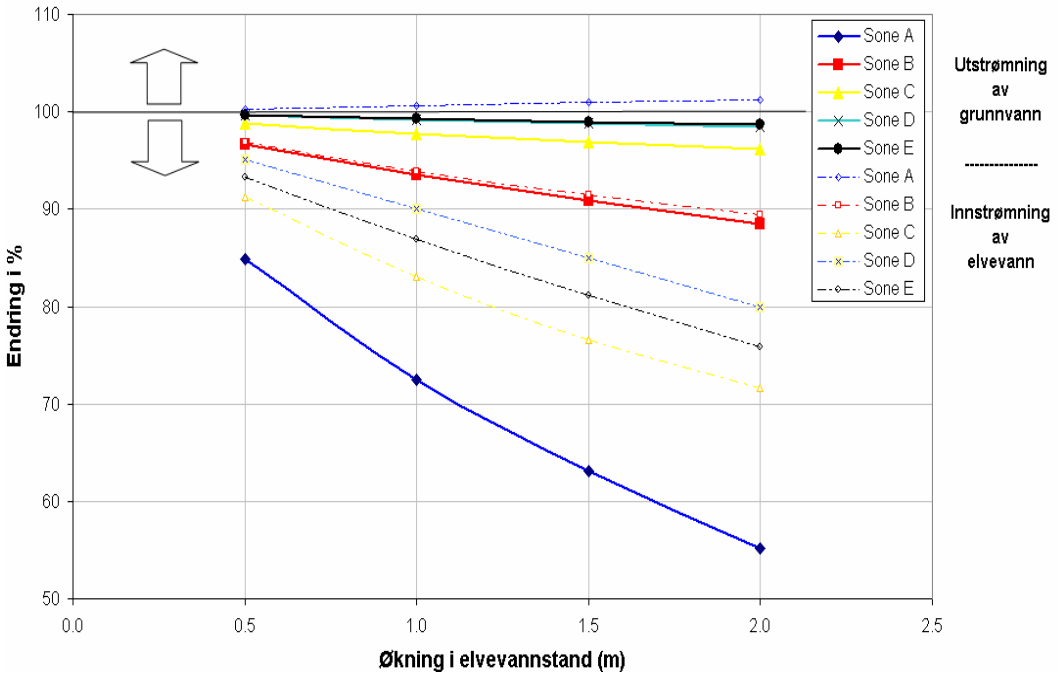
Figur 53. Effekt av økning av elvevannstand på vannutvekslingsmengder mellom grunnvannsmagasinet og Glomma. Total utstrømning av grunnvann (øverst), og innstrømning av elvevann (nederst), ved ulik elvevannstand i de ulike vannbalansesoner angitt i % av referanse. Referanse tilsvarer utvekslingsmengdene beregnet med den kalibrerte modellen (2002). Negative verdier indikerer en reduksjon av utstrømningsmengder av grunnvann.



Figur 54. Effekt av økning av elvevannstand på fordeling av vannutvekslingsmengder i de ulike vannbalansesoner. Utstrømning av grunnvann (øverst), og innstrømning av elvevann (nederst).



Figur 55. Effekt av økning av elvevannstand på antall dager med utstrømning av grunnvann (øverst) og innstrømning av elvevann (nederst). Negative verdier indikerer en reduksjon av antall dager i forhold til referanse (kalibrert modell).



Figur 56. Effekt av økning av elvevannstand på vannutvekslingsmengder mellom grunnvannsmagasinet og Glomma i de ulike vannbalansesonene. Data er presentert som endring i % i forhold til referanse (observert elvevannstand i 2002).

Endringer av vannstanden i Glomma har lite effekt på utvekslingsmengder. Figur 51 viser effekten av endringer i vannstand på total daglig vannutvekslingsmengde i sone B, mens figur 52 viser utvekslingsmengdene ved normal vannføring, flom og rett etter flom i hele modellområdet. I figurene 52 til 56 presenteres effekten av endringer i vannstand i forhold til referansetilstand i de 5 ulike vannbalansesonene (endringer i utvekslingsmengder, rom- og tidsfordelingen).

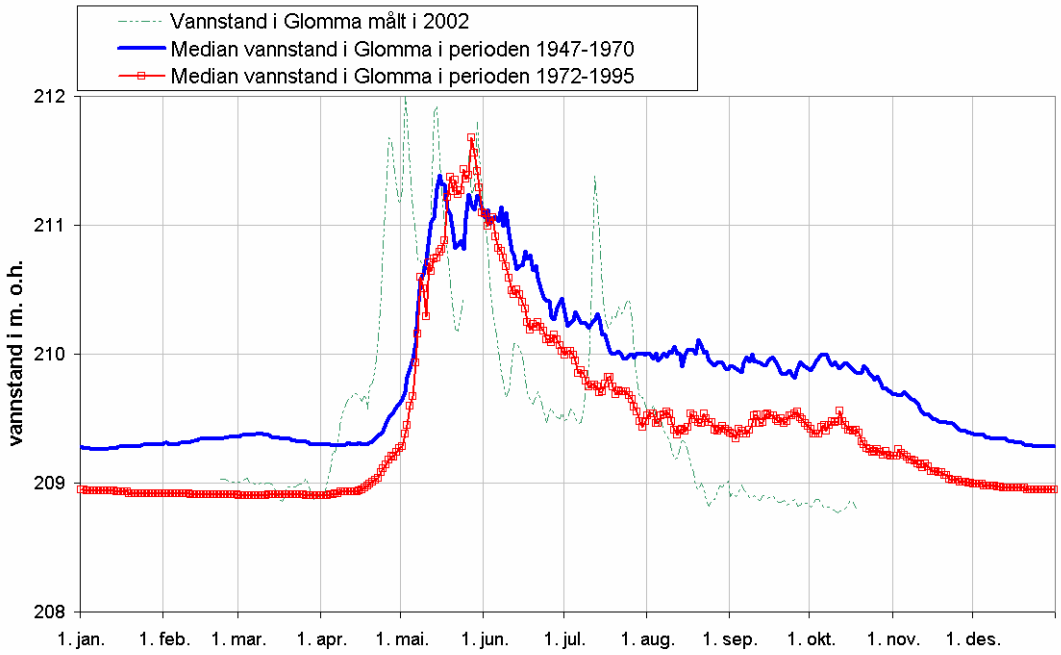
Høyere vannstand i Glomma fører til mindre gradient mellom grunnvannet og Glomma, og dermed mindre utveklingsmengder av vann. Dette forklarer at, generelt, både utstrømning av grunnvann og innstrømning av elvevann reduseres ved høyere vannstand i Glomma (figur 53). Figur 54 viser at høyere elvevannstand fører til en liten omfordeling i rom av innstrømningsmengdene av elvevann som blir større i den nordligste delen av elvesletta (sone A), men lavere i den sørligste delen (sonene C, D og E). Antall dager med utstrømning av grunnvann reduseres i sone A ved høyere elvevannstand, men øker litt i de andre sonene (figur 55). En økning i elvevannstand på 1 m gjør at utstrømningsmengder av grunnvannet blir redusert til ca. 90 % av referansemengder i sonen A, og 72 % i sone B. Samtidig blir innstrømningsmengdene i de samme sonene rundt 90 % av referanse (figur 56).

Ved endring av vannstand er grunnvannstrømningsbildene i akviferen nesten de samme som ved referansetilstand. Det gjelder også for flomperioder. Dette har imidlertid store konsekvenser på mektigheten til den umettede sonen, fordi grunnvannet stiger i takt med elvevannstandsøkningen. Dette har betydning for beskyttelse av grunnvannsmagasinet som f. eks. blir mer sårbar for lekkasjer av forurensning på jordoverflaten. Vannets oppholdstid i akviferen er ikke endret.

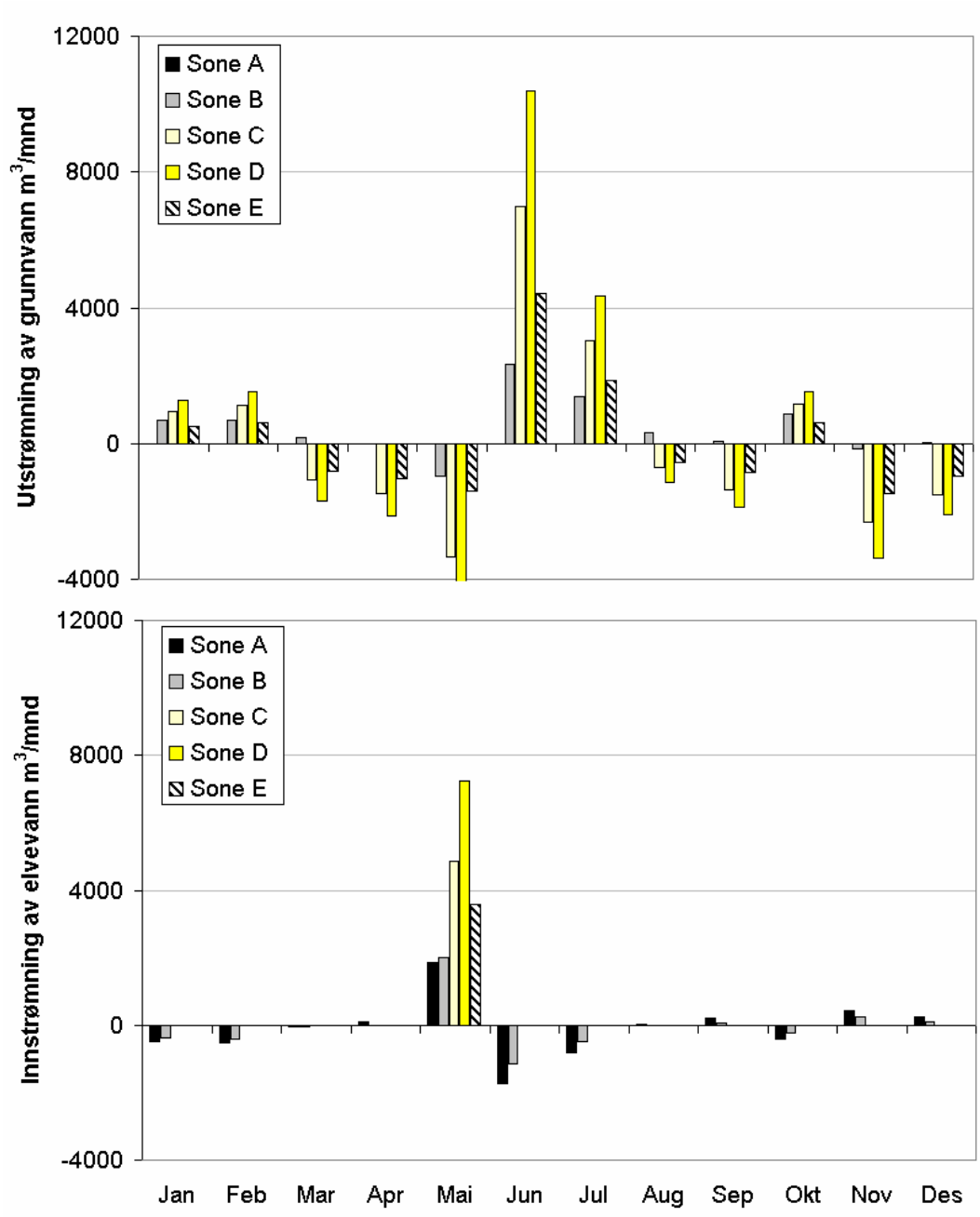
5.5. Effekt av regulering i Glomma

Formålet med denne analysen er å evaluere konsekvenser av reguleringen av Glomma på 70-tallet på vannutveksling i elvesletta i Rena. Glomma nord for samløpet med Rena elv anses egentlig som lite regulert siden de fleste sideelvene oppstrøms Rena som bidrar til vannføring i Glomma er uregulerte. Det er betydningen av overføringen fra Glomma til Rena elv som fant sted i 1971 som analyseres her (se kapittel 1.3 i rapport 2). Det er kun effekten av endringer i vannstand som analyseres. Grunnlagsdata er hentet fra målestasjonen Ståi oppstrøms Rena (se rapport 2). Simuleringene kjøres for 1 år (365 dager). Det beregnes normalår som daglige medianverdier for 23 år, før og etter reguleringen (1947-1970 og 1972-1995). Figur 57 viser at reguleringen har forårsaket en senkning på rundt 50 cm ved lav vannføring, men at det ikke registreres forskjell ved vårflom.

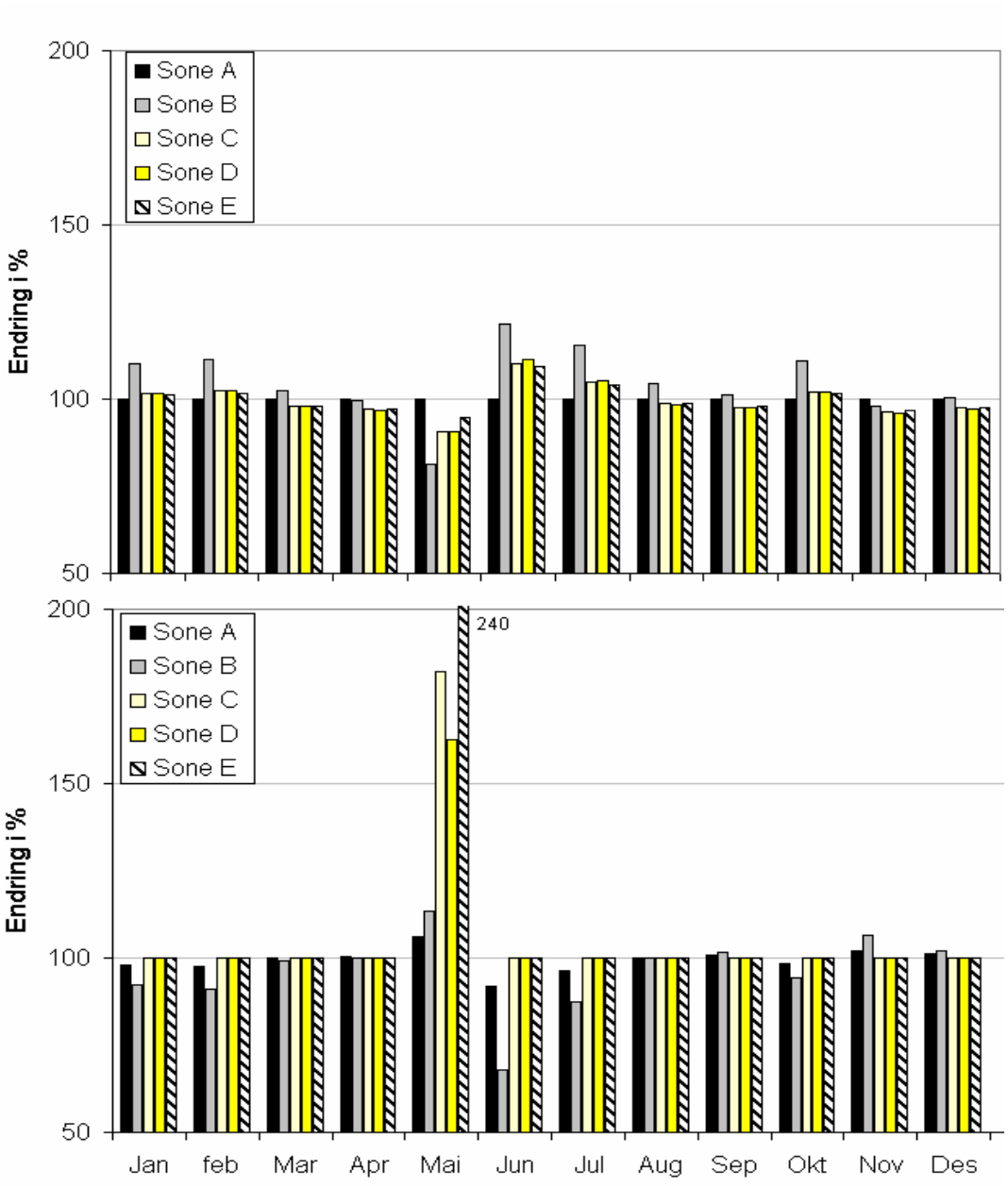
Grunnvannsdannelse (grunnvanntilsig fra platået og infiltrasjon gjennom terrengoverflaten) er satt konstant for alle scenarier (tilsvarende en effektiv nedbør lik 300 mm/år).



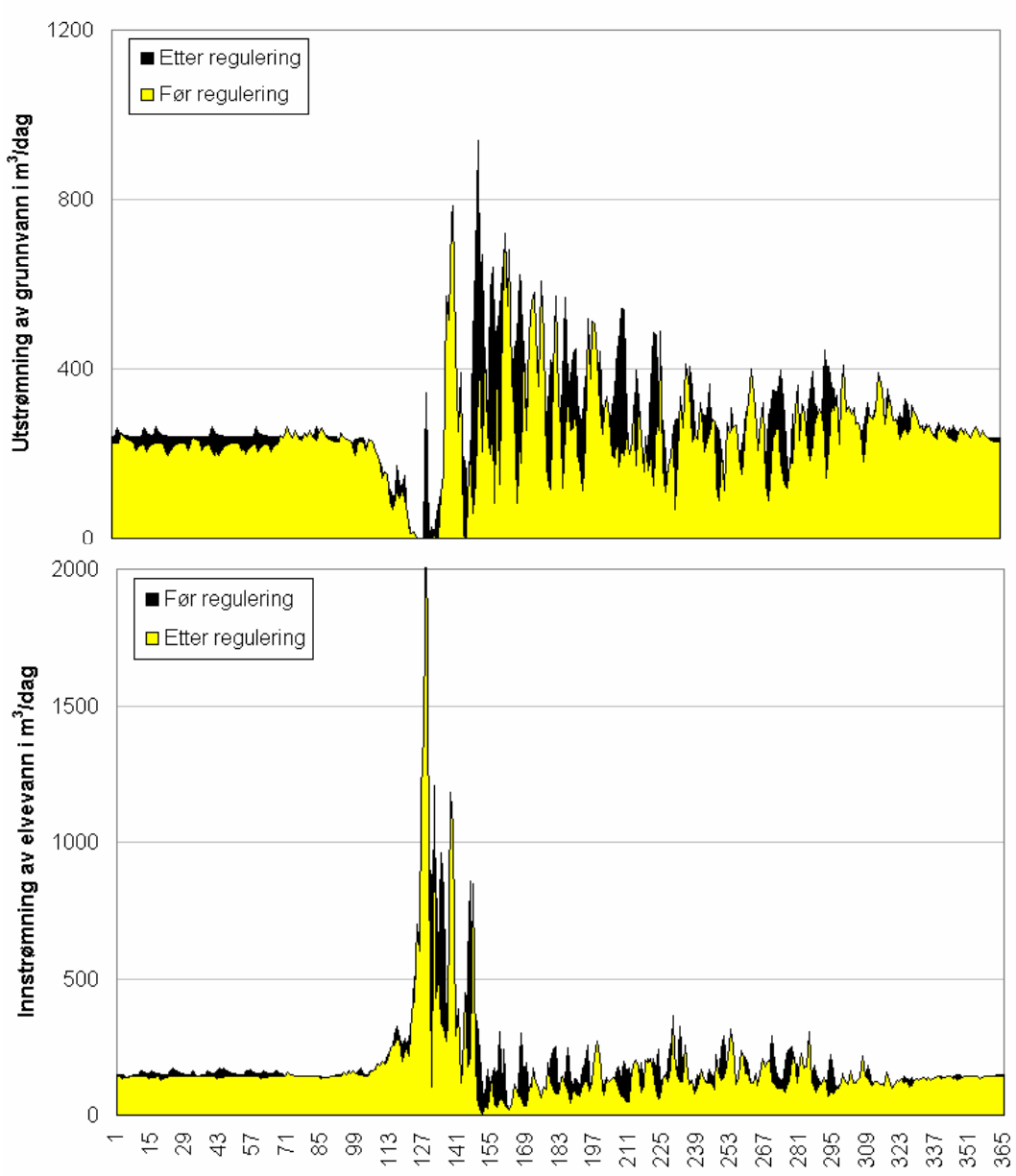
Figur 57. Median vannstand i Glomma i perioden 1947-1970 (før regulering) og 1972-1995 (etter regulering), samt vannstand målt i 2002 (kalibrert modell).



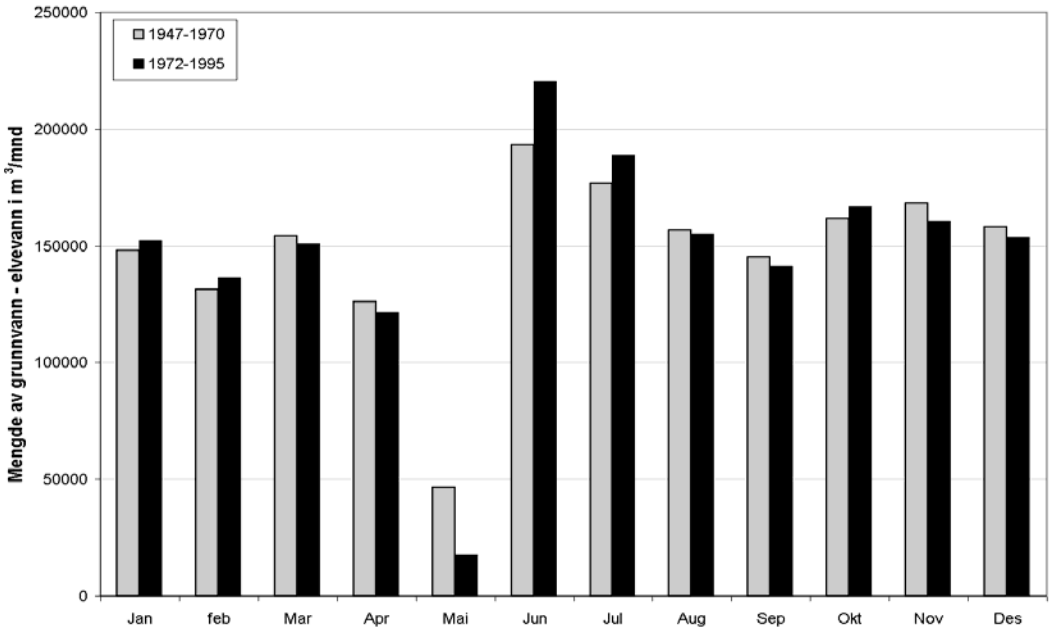
Figur 58. Endringer i vannutvekslingsmengder etter regulering. Utstrømning av grunnvann (øverst), og innstrømning av elvevann (nederst).



Figur 59. Endringer i vannutvekslingsmengde etter regulering. Endringene er angitt i % av tilstand før regulering. Utstrømning av grunnvann (øverst), innstrømning av elvevann (nederst).



Figur 60. Daglige utvekslingsmengder før (1947-1970) og etter reguleringen (1972-1995) i sone B angitt i m^3/dag. Utstrømning av grunnvann (øverst), og innstrømning av elvevann (nederst). En vannmengde på 2000 m^3/dag tilsvarer i sone B ca. 8 mm/dag.



Figur 61. Totalt grunnvannstilskudd før og etter reguleringen angitt i m^3/mnd.

Reguleringen (overføring til Rena elv) i 1971 har følgende konsekvenser (figur 58-61):

- Litt lavere utstrømningsmengder av grunnvann vår og høst (unntatt for oktober);
- Høyere utstrømningsmengder av grunnvann (ca. 120 % av referanse) etter vårflom (juni-juli)
- Betydelige høyere innstrømningsmengder (150-200 % av referanse) av elvevann i mai i begynnelsen av vårflom;
- De størst endringene registreres i de sørligste sonene: C, D og E;

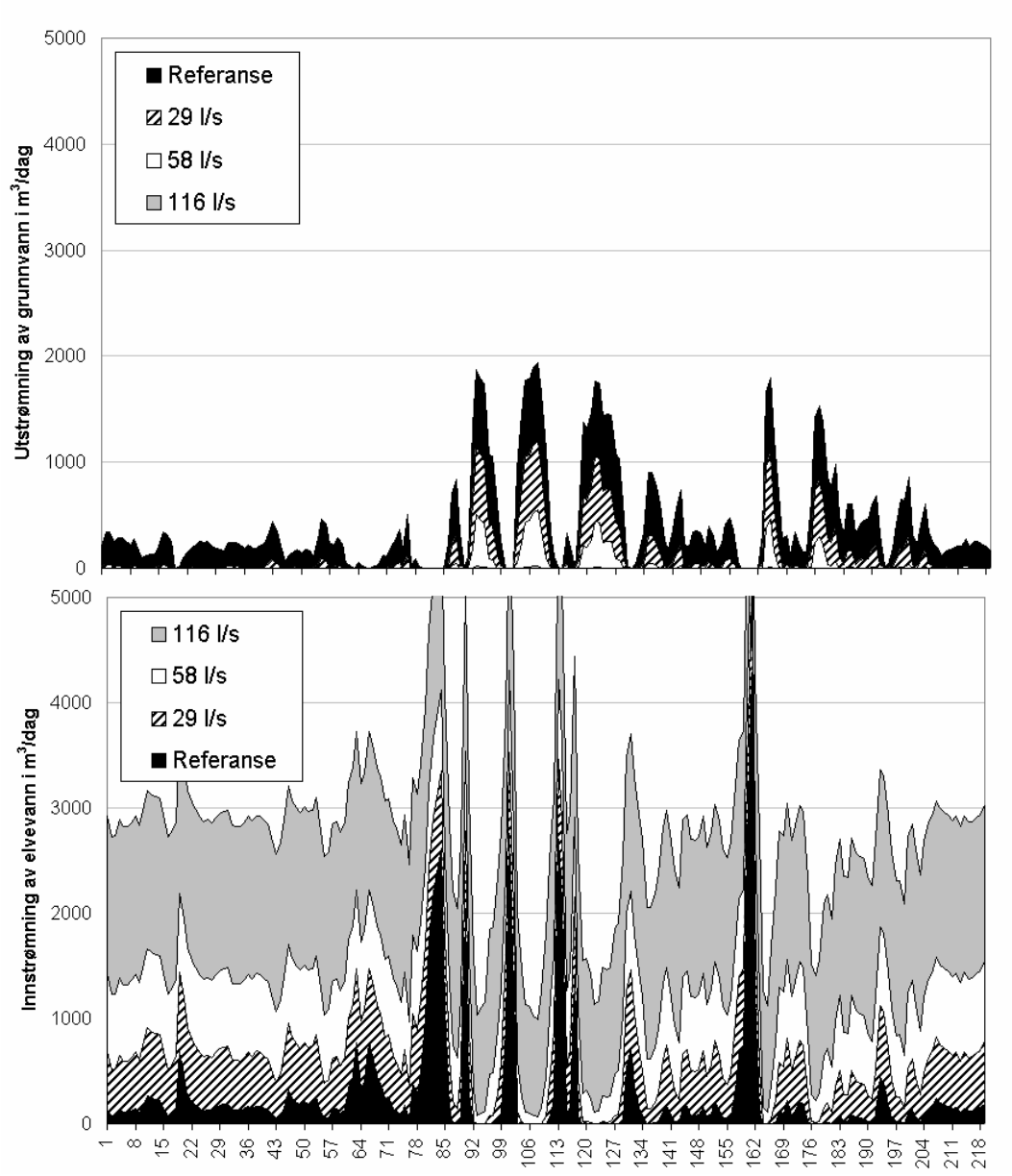
Dette tilsier at reguleringen har ført til høyere temporær lagring av elvevann inni grunnvannsmagasinet ved flom (”bank storage”), dette pga. lavere lavvannføring før flommen. Figur 61 viser at totalt grunnvannstilskudd til Glomma er litt mindre i mai ved begynnelsen av flommen, men litt høyere etter flom (juni-juli). Det er omlag samme mengde vann (3000 m^3/mnd eller ca. 11 mm/mnd) som strømmer ut i Glomma, men med en månedsforsinkelse.

Endringene er betydelige i mai, juni og juli, men ubetydelige i de andre månedene. Dette fordi utvekslingsmengdene av vann mellom grunnvannsmagasinet og elvevannet stort sett skjer ved raske fluktuasjoner i elvevannstanden (flom). Det er derfor i vårflomperioden det registreres de største endringene etter reguleringen.

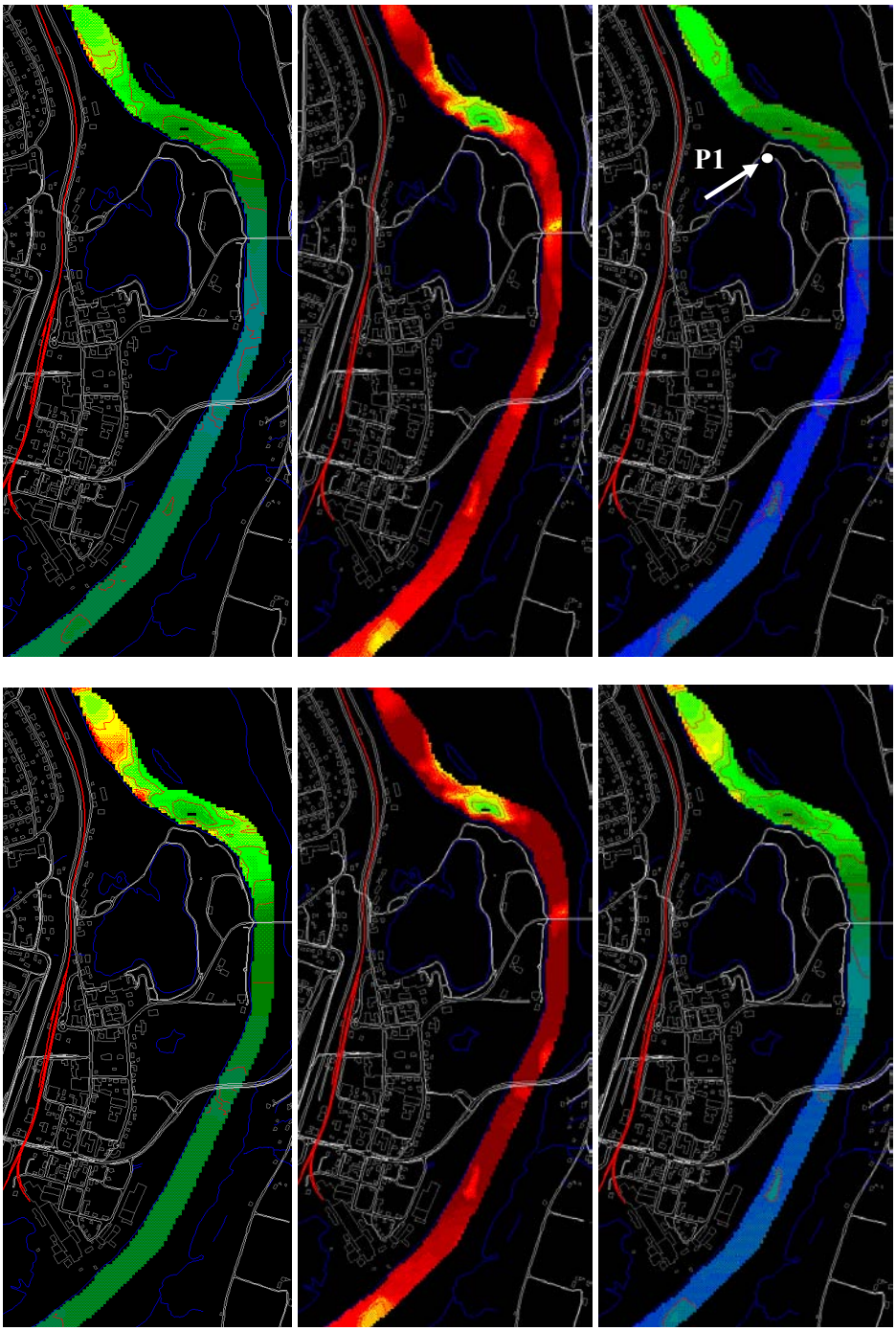
P.g.a. bruk av median-verdier i en 23 års periode kan disse resultatene være litt misvisende. Bruk av gjennomsnittsverdier eller glidende gjennomsnittsverdier for elvevannstand i modellen fører til en underestimering av utvekslingsmengder (se følsomhetsanalyser i kapittel 3.2.2.). Det beste hadde derfor vært å kjøre simuleringer for hvert år før og etter regulering. Dette er imidlertid, med det aktuelle modellverktøyet (Visual Modflow versjon 3.0), for tidkrevende.

5.6. Effekt av grunnvannsuttak

Grunnvannsuttaket i pumpebrønn P1 (figur 63) simuleres med konstant uttaksmengde i hele simuleringsperioden. Det simuleres tre ulike uttaksmengder: 29 l/s (eksisterende kapasitet), 58 l/s (2 ganger større) og 116 l/s (4 ganger større).



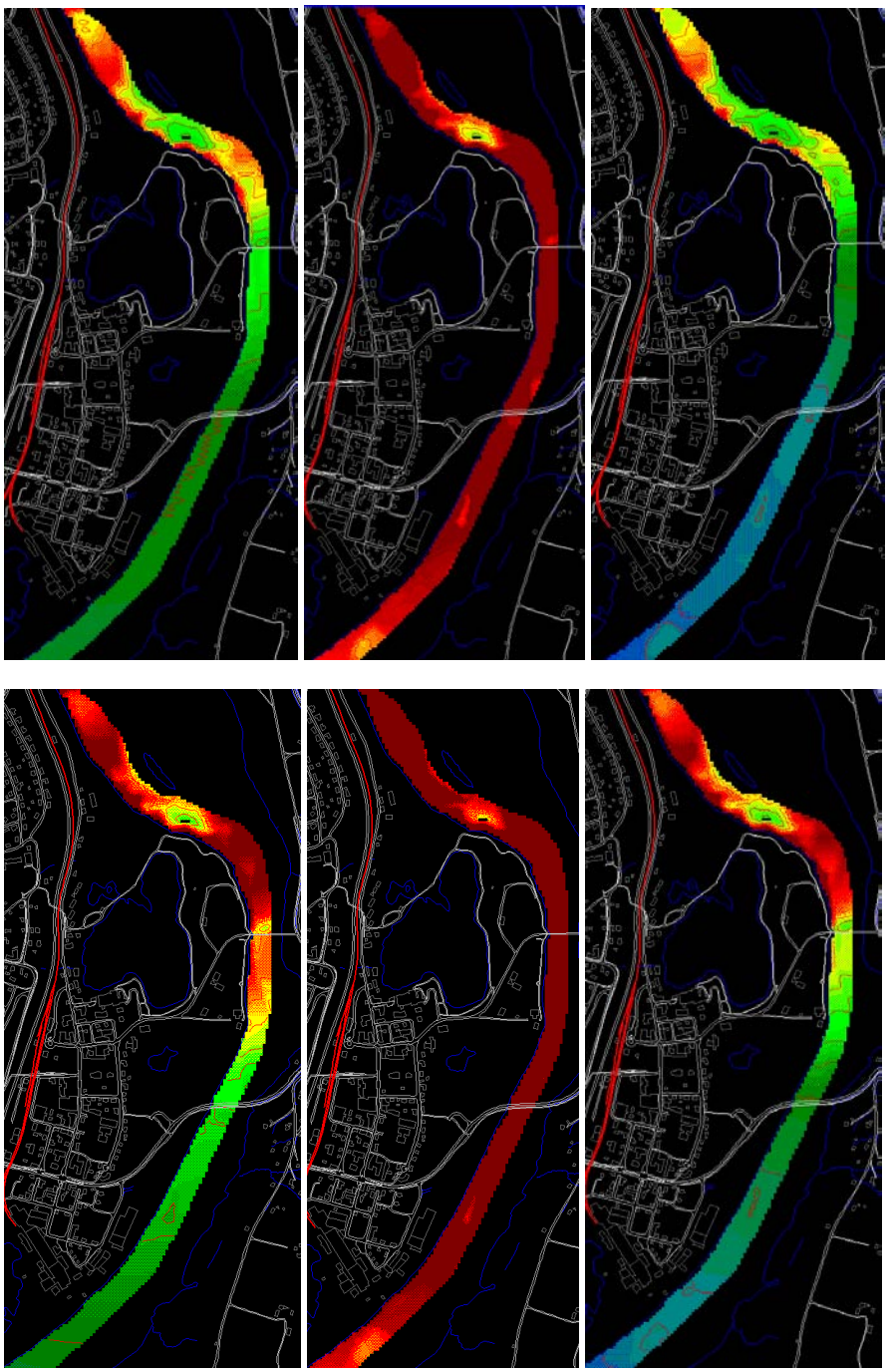
Figur 62. Effekt av grunnvannsuttak på vannutvekslingsmengder i sone B (Prestsjøen). Utstrømning av grunnvann (øverst), innstrømning av elvevann (nederst). Referansen er tilstand uten pumping. En vannmengde på 2000 m^3/dag tilsvarer i sone B ca. 8 mm/dag.



Normal vannføring (7. juli) Flom (10. juli) Etter flom (13. juli)

mm/dag	>20	15	10	5	0	5	10	>15
	Innstrømning av elvevann					Utstrømning av grunnvann		

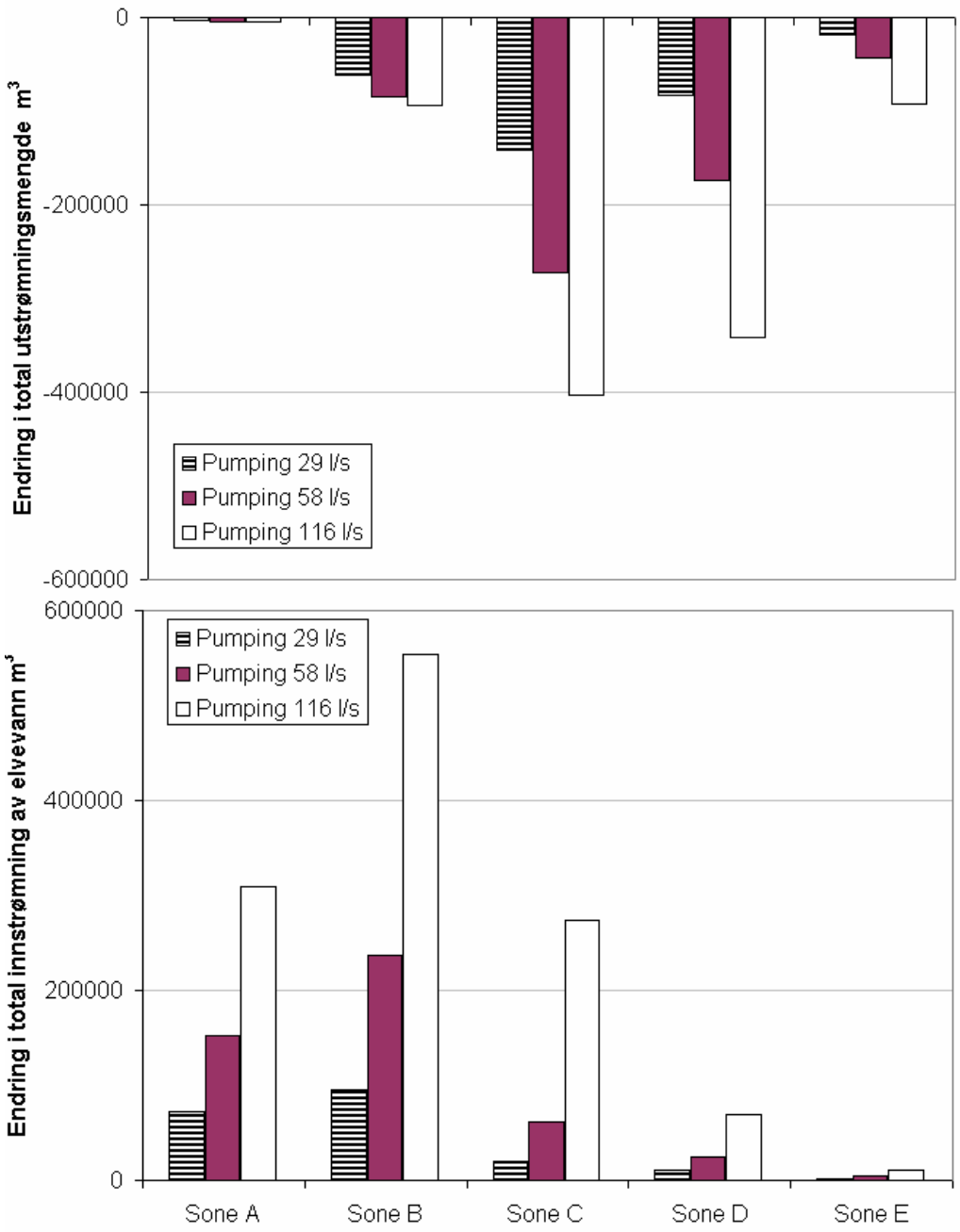
Figur 63. Utvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet angitt i mm/dag. Referanse: uten pumping (øverst), og med 29 l/s pumping (nederst).



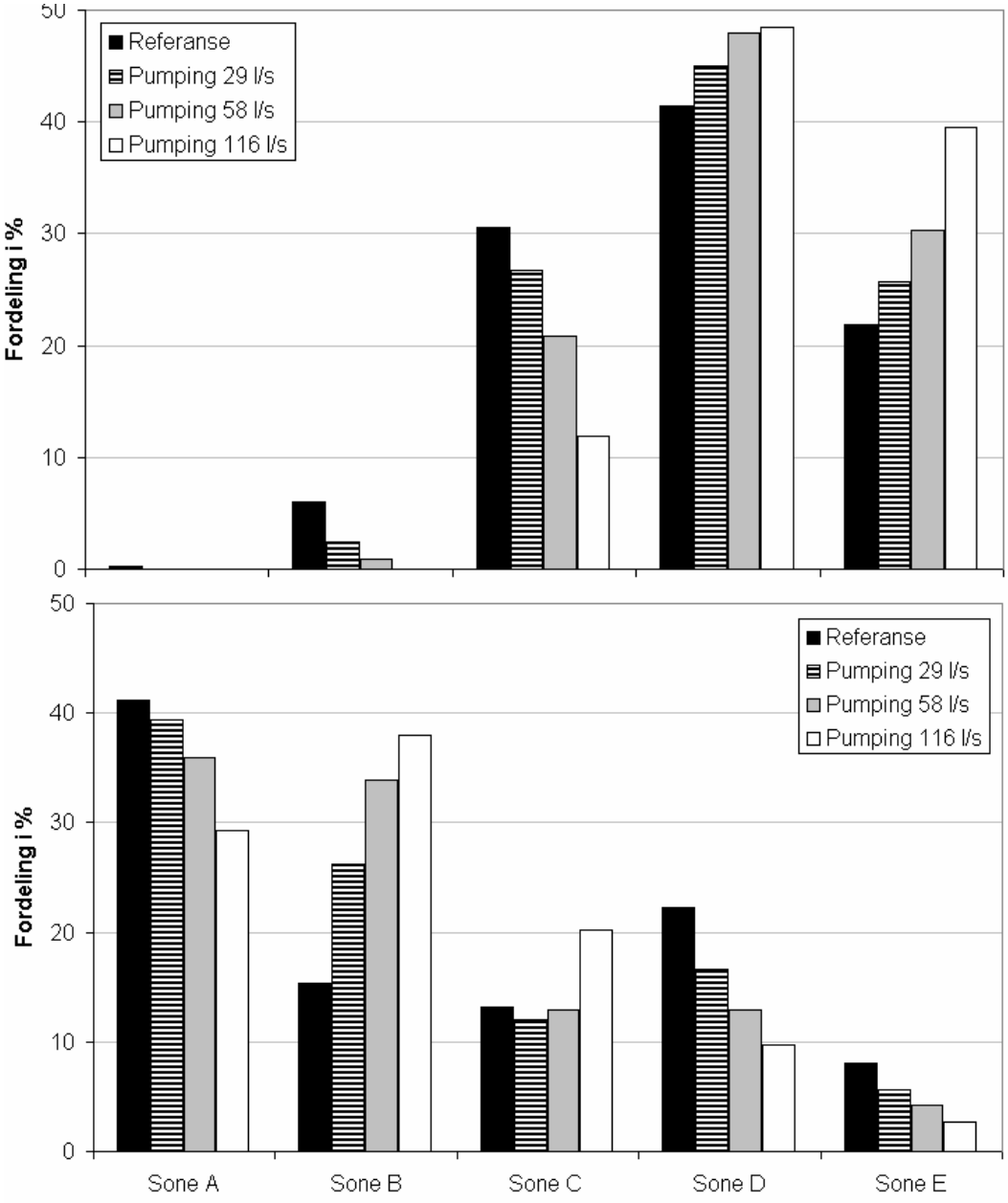
Normal vannføring (7. juli) **Flom (10. juli)** **Etter flom (13. juli)**

mm/dag	**>20**	**15**	**10**	**5**	**0**	**5**	**10**	**>15**
	Innstrømning av elvevann					**Utstrømning av grunnvann**		

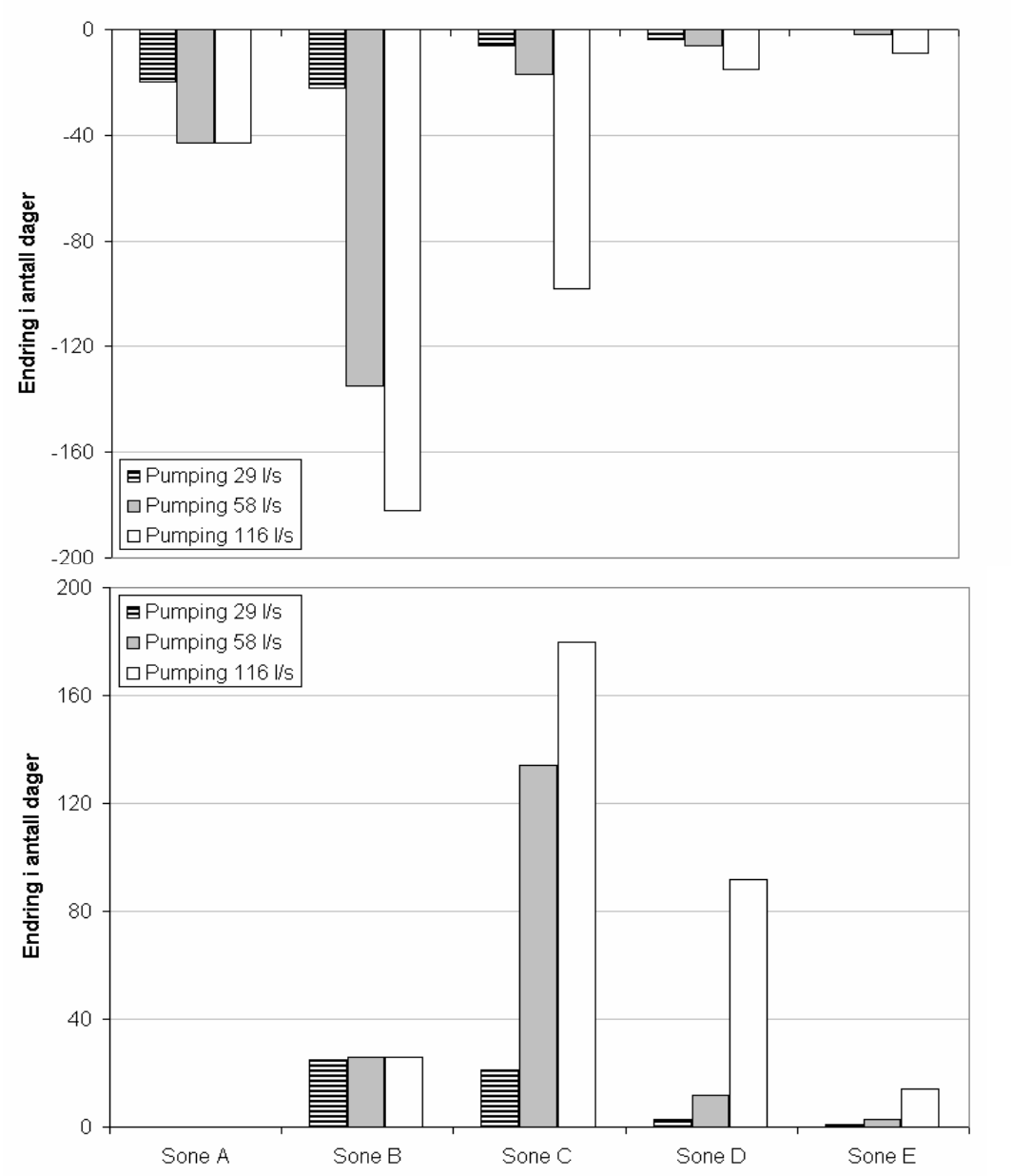
Figur 64. Utvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet angitt i mm/dag. Grunnvannsuttak på 58 l/s (øverst), og 116 l/s pumping (nederst).



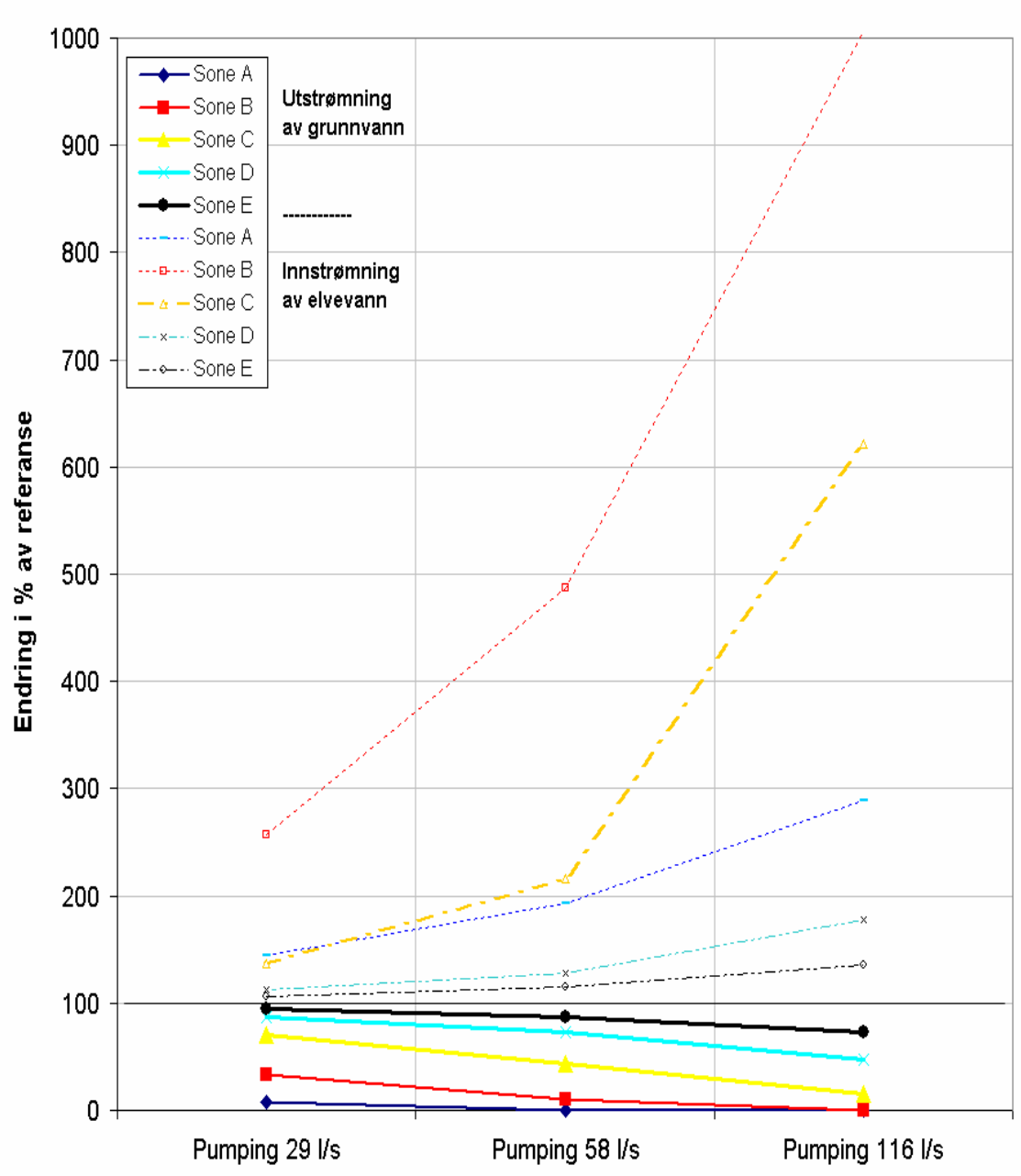
Figur 65. Effekt av grunnvannsuttak på total utvekslingsmengde (219 dager) i de ulike vannbalansesonene i forhold til referansetilstand uten pumping. Utstrømning av grunnvann (øverst), innstrømning av elvevann (nederst). Negative verdier indikerer en reduksjon av utstrømningsmengder av grunnvann.



Figur 66. Effekt av grunnvannsuttak på fordeling av vannutveksling i de ulike vannbalansesonene. Utstrømning av grunnvann (øverst), og innstrømning av elvevann (nederst). Referansen er tilstand uten pumping.



Figur 67. Effekt av endring i grunnvannsuttaksmengder på antall dager med utstrømning av grunnvann (øverst) og innstrømning av elvevann (nederst). Negative verdier indikerer en reduksjon av antall dager i forhold til referansetilstand (uten pumping).



Figur 68. Effekt av endring i uttaksmengder i pumpebrønn P1 på vannutvekslingsmengder i de ulike vannbalansesonene.

Grunnvannsuttak har betydelig effekt på utvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet. De største endringene skjer i den nordligste delen av elvesletta i nærheten av pumpebrønnen (sonene A, B og C).

Grunnvannsuttak fører til følgende endringer i forhold til normal tilstand uten pumping (figur 62-68):

- Lavere utstrømningsmengder av grunnvann i de nordligste sonene A, B og C; Et uttak på 58 l/s fører f. eks. til en utstrømningsmengde av grunnvann på rundt 40 % i sone C, rundt 15 % i sone B, og nesten 0 % i sone A i forhold til den naturlige tilstanden uten pumping.
- Betydelig høyere innstrømningsmengde av elvevann i alle soner, men spesielt i de nordligste sonene A, B og C; Et uttak på 58 l/s fører f. eks. til en innstrømningsmengde på rundt 500 % i sone B, og rundt 200 % i sonene A og C i forhold til den naturlige tilstanden uten pumping.

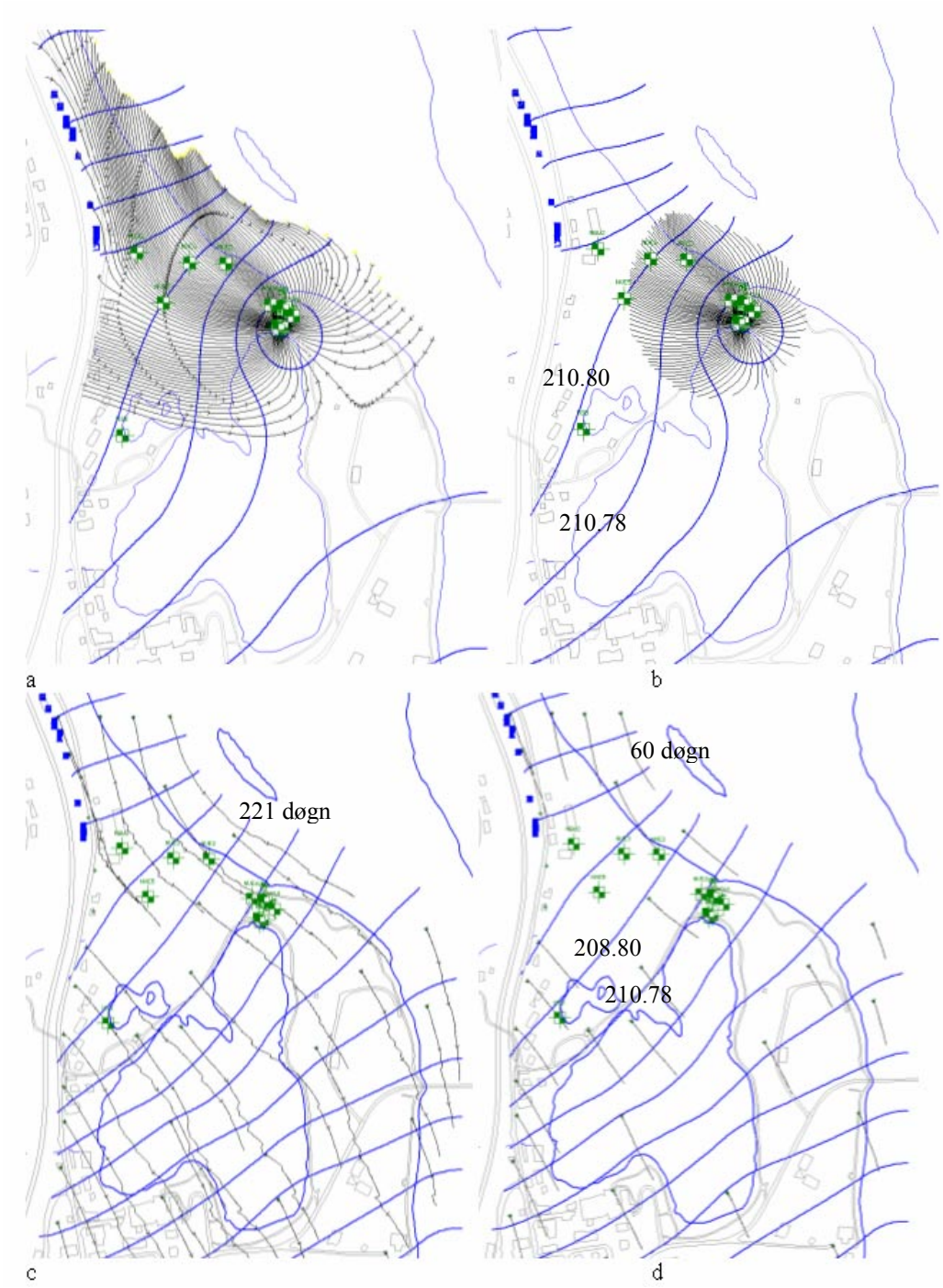
Ved uttak av grunnvann (figur 66 og 68) forflyttes utstrømning av grunnvann sørover, mens innstrømning av elvevann øker mest i de nordligste sonene. Antall dager med utstrømning av grunnvann i sone B reduseres med ca. 130 og 180 dager ved et grunnvannsuttak på henholdsvis 58 og 116 l/s. Innstrømning av elvevann øker med om lag samme antall dager i sone C (figur 67).

Uttak av grunnvann fører til endringer i strømningsforholdene i den nordligste delen av elvesletta (figur 69). Dette har betydning for vannets oppholdstid inni grunnvannsmagasinet som blir kortere. Dette har også betydning for vannets opphav fordi grunnvannsuttaket forårsaker infiltrasjon av elvevann.

Uttaksmengder i l/s – m^3/dag	% av naturlig grunnvannsfornyelse (kun nedbør)	% av alminnelig lavvannføring i Glomma[6]
29 - 2506	46	0.2
58 - 5012	91	0.4
116 - 10024	182	0.8

Tabell 22. Uttaksmengder av grunnvann presentert som prosentdeler av den naturlige grunnvannsdannelsen (stammer kun fra infiltrasjon av nedbør), og den alminnelige lavvannføringen i Glomma.

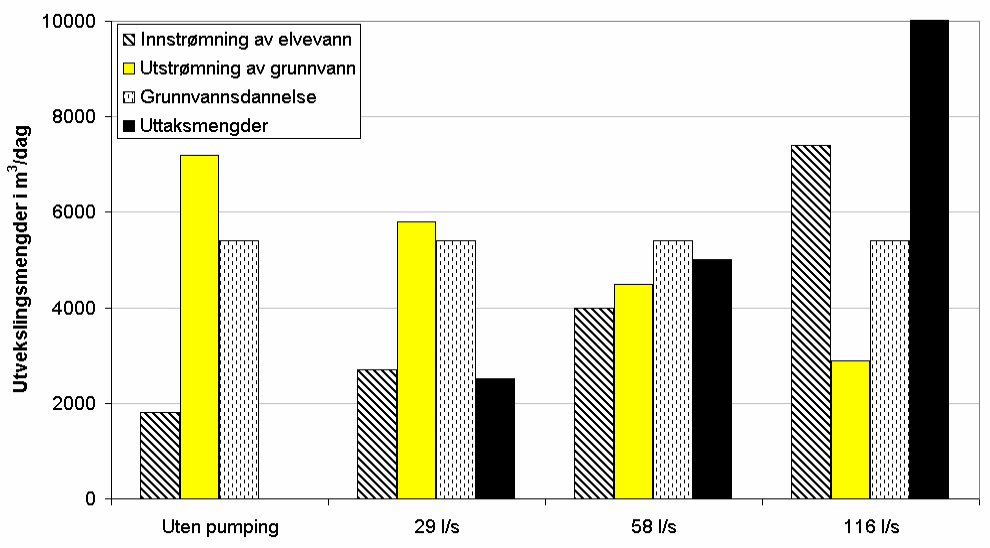
[6] ca. 15 m^3/s på Stai. Se tabell 15 i rapport 2.



Figur 69. Grunnvannstrømretninger og hastigheter: a og b: ved grunnvannsuttak på 29 l/s i pumpebrønn P1, og uten uttak c og d. a: totalt infiltrasjonsområde i det modellerte området; b og d: 60 døgns oppholdstid; c: 221 dager (simuleringsperiode). Hver pil representerer 60 døgn. De uthevete linjene indikerer grunnvannsnivåene (2 cm ekvidistanse, nivåene er angitt i m.o.h.). Effektiv porøsitet er satt til 10 %. Beliggenheten til observasjonsbrønnene er vist med firkanter.

Tabell 22 viser at uttaksmengden av grunnvann på Rena er neglisjerbar for den alminnelige lavvannføringen i Glomma. Hvis vi antar at det finnes 100 uttak av grunnvann i Glommas nedbørfelt oppstrøms Rena på 30 l/s, kan den totale uttaksmengden utgjøre 20 % av lavvannføring. Mesteparten av grunnvannet vil sannsynligvis komme tilbake i elva i form av relativt renset avløpsvann. Konsekvensene av grunnvannsuttak kan derfor være større når det gjelder elvevannets kvalitet enn vannføringen.

På Rena representerer et uttak på 29 l/s (vanlig pumperate), og et 2 og 4 ganger større uttak henholdsvis 46, 90 og 180 % av den naturlige grunnvannsdannelsen som kun stammer fra nedbør (tabell 22).



Figur 70. Gjennomsnittlige utvekslingsmengder som en funksjon av uttaksmengder og naturlig grunnvannsdannelse (nedbør).

Figur 70 og tabell 23 illustrerer konsekvenser av grunnvannsuttak på utvekslingsmengder. I gjennomsnitt vil et grunnvannsuttak på 58 l/s føre til en reduksjon av grunnvanntilsig til Glomma på 2700 m^3/dag og en økning av innstrømning av elvevann (indusert fluks) på 2200 m^3/dag. Ved et større uttak vil reduksjonen av grunnvanntilsig være lavere enn økningen av indusert elvevanns infiltrasjon.

Uttaksmengder av grunnvann m^3/dag	Innstrømning av elvevann m^3/dag	Økning av innstrømning av elvevann m^3/dag	Utstrømning av grunnvann m^3/dag	Reduksjon av utstrømning av grunnvann m^3/dag
0	1800	0	7200	0
2506	2700	900	5800	1400
5012	4000	2200	4500	2700
10024	7400	5600	2900	4300

Tabell 23. Konsekvenser av grunnvannsuttak på gjennomsnittlige utvekslingsmengder som en funksjon av ulike uttaksmengder.

Uttaksmengder av grunnvann m^3/dag	Total grunnvannsdannelse inkludert indusert infiltrasjon av elvevann m^3/dag	Indusert innstrømning av elvevann %	Naturlig grunnvannsdannelse + naturlig innstrømning av elvevann %
0	5400+1800=7200	0	100
2506	5400+2700=8100	11	89
5012	5400+4000=9400	23	77
10024	5400+7400=12800	44	56

Tabell 24. Estimert prosentdel av grunnvannsuttak som stammer fra den naturlige grunnvannsdannelsen og den induserte infiltrasjonen fra elvevann.

Tabell 24 viser at et grunnvannsuttak på ca. 29 l/s i gjennomsnitt består av ca. 89 % grunnvann og 11 % indusert elvevann. Et uttak på 58 og 116 l/s består henholdsvis av 23 og 44 % direkte indusert elvevann.

Grunnvannsuttak bidrar til lavere vannføring i Glomma gjennom to komponenter:

- reduksjon av grunnvannstilsig;
- indusert infiltrasjon av elvevann i grunnvannsmagasinet.

Redusert utstrømning av grunnvann representerer på Rena hovedbidraget til reduksjon av vannføring i elva. Dette kan derfor ha konsekvenser for vanntemperatur og vannkvalitet i elva.

Reduksjon av grunnvannstilsig oppstår kort etter pumpestart og er større enn elvevannets infiltrasjon. Grunnvannstilsig reduksjonen står for 90 % av den totale reduksjon av vannføringen for Glomma ved et uttak på 29 l/s. Ifølge Chen og Shu (2002) kan reduksjonen av grunnvannstilsig vare flere dager/uker etter at pumping har stoppet, mens indusert infiltrasjon stopper raskt. Dette er noe vi ikke har analysert i dette prosjektet, men som er interessant mht. temporært uttak av grunnvann. Det er f. eks. ofte at vannverkene pumper grunnvannet kun om natten for å spare på strømpris.

Om beskyttelsessoner rundt pumpebrønnen

For godkjenning av grunnvannsverk er det nødvendig med tilfredsstillende dokumentering av grunnvannskvalitet, -influensområdets størrelse og sårbarhet. Loven forvaltes av helsemyndighetene gjennom klausuler på vannverkets influensområde, som deles inn i soner etter vannets oppholdstid fra infiltrasjon til brønnpunkt. Sonene er pålagt forskjellige restriksjoner mot menneskelig aktivitet, hvorav de to første soner har den strengeste båndleggingen. Restriksjonene vurderes individuelt fra vannverk til vannverk og avhenger av type aktivitet i infiltrasjonsområdet.

Ved klausulering deles området inn i fire soner:

- Sone 0 anordnes med utstrekning 10 – 30 m fra brønnpunktet for å beskytte de tekniske installasjonene og selve brønnpunktet.
- Sone I er det sikre infiltrasjonsområdet. Ytre grense beregnes for 60 døgns transporttid av grunnvann i mettet sone frem til brønnen under maksimal pumpebelastning. Grensen er satt som sannsynlig maksimal levetid for mikrobiologiske organismer (dvs. bakterier, virus, parasitter, sopp og alger).
- Sone II bør omfatte det området hvorfra grunnvann permanent eller tidvis med sikkerhet når frem til brønnen under maksimal pumpebelastning.
- Sone III er en sikringssone som omfatter:

  - eventuelle usikre arealer av infiltrasjonsområdet;

  - lokale overflatenedbørfelt utenfor sone II, og øvrige arealer som kan være av betydning for forurensningsmulighetene.

Kriteriene for fastsettelse av soneinndelingen er vanligvis basert på resultater fra enkle pumpeforsøk og analytiske metoder for bestemmelse av sonen med 60-døgnoppholdstid inn i grunnvannet.

Figur 71 viser beregnet totalt infiltrasjonsområde og 60-dagers vannoppholdstid som funksjon av ulik effektiv porøsitet. Resultatene fra pumpetester, sporstoff-forsøk og kalibreringen av grunnvannsmodellen viser at i gjennomsnitt ligger den effektive porøsiteten rundt 10 %. Porøsiteten vil bare virke inn på oppholdstiden, og ikke på formen til infiltrasjonssonene. Under simuleringene er akviferen satt til å være isotrop og homogen. I virkeligheten vil dette aldri være tilfelle. Det kan derfor være tilfeller hvor vannet følger foretrukne strømningsveier, og slik sett vil få en kortere oppholdstid enn antatt.

Kravet fra Folkehelsa om 60 døgns oppholdstid ved maksimal pumpekapasitet i den mettede sonen er sannsynligvis tilfredsstilt for reservekilden på Rena ifølge resultatene fra simuleringene med et uttak på 29 l/s. Infiltrasjonsområdets form funnet ved bruk av modellverktøy overensstemmer relativt bra med klausulering fastsatt av NGU for Åmot kommune i 1982 (figur 71). Sone 2 kunne imidlertid vært redusert i sin sørligste del (campingområdet), og omfatte en større del av Prestegårdsjordene langs Glomma. Det totale infiltrasjonsområdet omfatter egentlig en del av platået, og hele det såkalte tilsigsområdet til Prestegård (se figur 5). Det er spesielt kommunikasjonsveier og avløpsnettet som kan betraktes som potensielle forurensningskilder i dette området. Pga. stor mektighet av siltig fin sand i Prestegårdsjordene betraktes jordbruksaktivitet ikke som en stor trussel for grunnvannskvaliteten hvis restriksjoner for bruk av gjødsel og sprøytemidler følges.

Grunnvannsfluktuasjoner viser at mektigheten til den umettede sonen kan reduseres til mindre enn 1 m ved middelflommer, og forsvinner ved høy flom (oversvømmelse i 1995), noe som øker sårbarheten til grunnvannsmagasinet betraktelig.

Figur 71. Øverst: Soneinndeling utarbeidet av NGU i 1982. Sone 2: den fjerne infiltrasjonssonen; sone 1: den nære infiltrasjonssonen (oppholdstid av vann som infiltreres i denne sonen er antatt mindre enn 60 døgn); sone 0: nærområde rundt brønnområdet som er gjerdet med låsbar port. Nederst: Beregnet oppholdstid ved bruk av modellverktøy. De tre første sonene tilsvarer en beregnet oppholdstid på 60 døgn med ulik effektiv porøsitet (5, 10 og 20 %). Den ytre sonen tilsvarer det totale infiltrasjonsområdet i det modellerte området (infiltrasjonsområdet omfatter egentlig en del av platået – tilsigsområdet til Prestsjøen).

6. Konklusjoner

I denne konklusjonen oppsummeres og drøftes resultatene oppnådd i dette prosjektet. Først presenteres en oppsummering av resultatene fra feltmålinger og klassiske grunnvannsanalyser, deretter fra grunnvanns-modellering. Til slutt, og i lys av disse resultatene, diskuteres potensiell betydning av grunnvannstilsig til Glomma for økosystemet.

Halvparten av tidsforbruket ved analyse tilknyttet grunnvannsressurser utgjøres av anskaffelse av bakgrunnsmaterialer, systematisering av denne informasjonen og tilrettelegging for et riktig format. Feltarbeid, tolkningen og presentasjon av feltdata er tid- og ressurskrevende. Vi har derfor i dette prosjektet gitt en beskrivelse av prosedyrer for datainnsamling, prosessering og rapportering. Dette prosjektet gir grunnlag for å evaluere hvilke metoder som er best egnet, og hva det minste datagrunnlaget som trenges er for å kunne utføre konsekvensanalyser av grunnvannsuttak eller av redusert vannføring.

Feltmålinger

Sonderboringer, georadarundersøkelser, pumpetester, vannstandsmålinger, vannkvalitetsanalyse, samt systematisering av tilgjengelig hydrogeologisk informasjon, ble anvendt for å karakterisere grunnvannsmagasinet i Rena og dets interaksjon med Glomma.

Grunnvannsmagasinet på Rena består av heterogene fluviale og glasifluviale sedimenter og er et åpent infiltrasjonsmagasin, der grunnvannsnivået styres av vannstanden i Glomma.

Georadar har vist seg å være et nyttig verktøy for å utføre dybdeprofilering i Glomma, og bestemme struktur og tykkelse til fluviale sedimenter i elvesletta og til bunnsedimenter i Glomma.

Regresjon og interpolasjonsanalyser av vannstandsmålinger alene har vist seg å ikke være egnet til å karakterisere interaksjonen mellom elvevann og grunnvann. Analyse av strømningsforholdene med denne type tilnærming krever dessuten, for å oppnå tilfredsstillende kvalitet, automatiske registreringer av grunnvannsstand i mange observasjonsrør i hele grunnvannsmagasinet. Denne typen tilnærming er for tidkrevende og kostbar. Grunnvannstand styres av elvevannstand, og analyser av

grunnvannsvariasjoner i forhold til elvevannstand gir derfor egentlig lite informasjon om prosessene.

For å analysere interaksjonen mellom grunnvann og elvevann er det behov for informasjon om tre viktige punkter mht. hydrologi. Det første punktet er gradienten i elva, det andre er endringen i elvevannstand og det tredje er grunnvannstilsig fra det overliggende nedbørfeltet. De to første punktene er relativt lette å estimere, gjennom enkel nivellering, og logging av elvevannstand (helst på timebasis). Det siste er det mest vanskelige å estimere, fordi tilsiget ikke kan måles direkte i felt, men må evalueres fra nedbørfeltets karakteristikker som areal, arealbruk, geologi, klima og menneskelige inngrep.

Bruk av miljøindikatorer som vanntemperatur og elektrisk ledningsevne har vist seg å være nyttig for å øke forståelsen for vannutveksling mellom grunnvannsmagasinet og elvevann, men også som viktig input for å kalibrere grunnvannsmodellen. Vi har ikke kjennskap til andre undersøkelser hvor disse miljøindikatorene ble brukt for å beregne utvekslingsmengder mellom grunnvann og elva. Både temperatur og ledningsevne viser at under naturlige forhold er grunnvannskvaliteten i en viss avstand fra elva upåvirket av elvevannets kvalitet uavhengig av vannstanden i elva, mens grunnvannet rett under Glommas bunn står i direkte kontakt med elva og påvirkes i flomperioder.

Vannkjemianalyser bekrefter at under normale forhold er grunnvannskvaliteten i liten grad avhengig av vannkvaliteten i Glomma. Ved stort grunnvannsuttak som på Almemoen vannverk er grunnvannet mer ionefattig og indikerer påvirkning fra Glomma. Dette trenger ikke å være noen ulempe m.h.p oksygenmetning, jern- og mangan-konsentrasjoner, såfremt de hygieniske aspekter er ivaretatt. Det er ikke målt oksygeninnhold i grunnvannet på Rena, men på basis av stor grad av jernutfellinger i grunnvannsprøvene, er det grunn til å anta at det er lav oksygenmetning og reduserende forhold mange steder. Dette kan ha større konsekvenser for vannkvalitet i bunnsedimentene, og dermed for økosystemet i bunnsedimentene.

Grunnvannsmodellering

Resultatene fra modellarbeidet viser at grunnvannsnivåene varierer kraftig i takt med elvevannstanden, men at strømningsbildet er relativt konstant over hele året. Det registreres ikke noen spesielle endringer mellom normal vannføring og lavvannføring (vinterforhold). Det er kun ved raske endringer av elvevannstand (flom) at strømningsbildet endrer seg kraftig. Det er raske fluktuasjoner i elvevannstand som viser seg å kontrollere utvekslingsmønster og -mengder.

Ved flom stoppes opp tilskudd av grunnvann til elva først, deretter lagres temporært elvevann inn i grunnvannsmagasinet. Dette vannvolumet frigjøres igjen ved fallende vannføring etter flomkulminasjon. Elvesletta på Rena bidrar f. eks. i flommen som fant sted i juli 2002 til en reduksjon av vannføringen med 38 000 m^3/dag (tilsvarende ca. 150 mm/dag). Vannbalansen for hele simuleringsperioden (februar-september 2002) er positiv for grunnvannstilsig. Det er et tilskudd av grunnvannstilsig på ca. 5340 m^3/dag eller 20 mm/dag. Det kun få dager i løpet av året hvor elvevann infiltreres direkte i grunnvannsmagasinet.

Geologien, klimaet og menneskelig aktivitet har stor betydning for grunnvannstilsig fra platået. Videre har dette betydelig effekt på utveskslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet. En endring i grunnvannsdannelse på f. eks. 200 % (4 ganger større enn referanse) fører til at utstrømningsmengder av grunnvannet blir over 800 % og 400 % av referansemengder i de to nordligste sonene av elvesletta (sonene A og B i figur 18). Økning av grunnvannsdannelse fører til lavere vannoppholdstid og høyere vannhastighet i grunnvannsmagasinet. Grunnvannsuttak har betydelig effekt på utvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet. Dette har betydning for vannets oppholdstid inni grunnvannsmagasinet som blir kortere. Dette har også betydning for vannets opphav fordi grunnvannsuttaket forårsaker infiltrasjon av elvevann. Et grunnvannsuttak på ca. 29 l/s i pumpebrønnen (Reservekilden) i Rena består i gjennomsnitt av ca. 89 % grunnvann og 11 % indusert elvevann. Et uttak på 58 og 116 l/s består henholdsvis av 23 og 44 % direkte indusert elvevann. Grunnvannsuttak bidrar til lavere vannføring i Glomma gjennom to komponenter: reduksjon av grunnvannstilsig og indusert infiltrasjon av elvevann i grunnvannsmagasinet. Dette kan ha stor betydning for vanntemperatur og vannkvalitet både i elva og grunnvannsmagasinet. Renseeffekten til elvas bunnsediment er vesentlig for vannkvaliteten i brønnen. Endring i grunnvannkvalitet kan være en konsekvens av direkte infiltrasjon av elvevann med dårlig kvalitet, men også av geokjemiske reaksjoner (oksidasjon/reduksjon) som følge av endring i grunnvannstand og strømningsforhold.

Massetransport og erosjonsprosesser kontrollerer mektigheten og sammensetningen til bunnsedimenter og dermed infiltrasjonsgraden. Dybden og bredden til elveløpet bestemmer infiltrasjonsarealet, samt den hydrauliske belastningen, og er derfor to viktige parametre som til en viss grad kontrollerer vannets infiltrasjon. Endringer i egenskapene

til bunnsedimenter (mektighet og permeabilitet) har også vist seg å ha stor betydning for utvekslingsmengder mellom Glomma og grunnvannsmagasinet. En 10 ganger lavere mektighet, eller 10 ganger større permeabilitet, fører til at utstrømning av grunnvannet blir over 200 og 500 % av referansemengder i de to nordligste sonene av elvesletta (sonene A og B i figur 18). Lavere mektighet eller høyere permeabilitet av bunnsedimenter fører til høyere vannbevegelser i grunnvannsmagasinet, og dermed lavere vannoppholdstid.

Endringer av vannstand i Glomma har derimot lite effekt på utvekslingsmengder, på strømningsforhold og vannoppholdstid.

Formålet med å bygge en grunnvannsmodell på Rena var å øke forståelsen for de fysiske prosessene som styrer interaksjonen mellom grunnvann og elvevann. Gjennom følsomhetsanalysen var det mulig å evaluere viktigheten til ulike parametre som kontroller utvekslingsmønster, som vannstand, mektighet og permeabilitet til bunnsedimenter, og grunnvannsdannelse. Det var også mulig å bruke modellen for å evaluere konsekvensene av vassdragsinngrep på grunnvann og grunnvannsuttak for vannføring og vannkvalitet. Numeriske grunnvannsmodeller som Modflow har større fordeler i forhold til analytiske metoder, fordi mer realistisk hydrologiske forhold i elv-akvifer-systemer kan tas i betraktning. Bruk av slike modellverktøy krever imidlertid informasjon om grunnvannsmagasinet og inputdata for modellkalibrering og -validering. Det krever at man identifiserer og definerer det geometriske systemet. Både elven og den underliggende akviferen må være beskrevet på en tilfredsstillende måte for å kunne analysere interaksjonen mellom de to miljøene. Geometrien og egenskapene til grunnvannsmagasinet (permeabilitet, porøsitet..) må være målt i felt eller estimert. I tillegg er det behov for grunnvannsnivåer eller flukser for å kunne kalibrere modellen. Kvaliteten til modellen avhenger først og fremst av kvaliteten på dataene som er brukt for å bygge modellen.

Beskrivelsen som vi får fra Rena-modellen er i utgangspunktet stedspesifikk. Rena-modellen er derfor i utgangspunktet et verktøy for å evaluere fungeringen av en begrenset strekning av elva. Ved å identifisere faktorene og prosessene som definerer og kontrollerer vannutvekslingsmengder og – mønster, vil en slik modell imidlertid kunne benyttes for å øke forståelsen av interaksjonen mellom elva og grunnvannsmagasinet på en regional skala. Modellen som vi bygde på Rena er stort sett gyldig for større vassdrag med klimatiske og geomorfologiske trekk av Østlandet. I samarbeid med Interconsult ASA er det derfor valgt å utføre samme type arbeid med et lite regulert vassdrag på Vestlandet (Osa) med skarp topografi, en annen type geologi og klima.

Sluttkommentarer

Norge kjennetegnes av et overskudd av vann som skyldes mye nedbør og moderat fordampning. Dette fører til høy avrenning, høy overflateavrenning og høy grunnvannsavrenning. Norge kjennetegnes også, pga sin kvartærgeologiske historie, av små, tynne og heterogene grunnvannsmagasiner, med innslag av grove og permeable sedimenter.

Grunnvannsmagasinene i Norge som ikke ligger langs et vassdrag, er ”selvmatede” grunnvannsmagasiner, der nydannelsen av grunnvann er avhengig av nedbørs- og avsmeltingsforhold. Vannet som lagres i disse grunnvannsmagasinene beveger seg langsomt og relativt konstant nedover mot et utstrømningsområde (bekk, elv, innsjøer). Disse grunnvannsmagasinene yter et tilskudd til vannføringen ved å strømme inn i elvene gjennom bunnsedimentene. I vassdrag som ikke har tilsig fra breer, og i periodene uten regn eller snøsmelting, sørger grunnvannstilsig for at vannføringen i vassdragene opprettholdes. Dette fører til at mesteparten av vannet i elvene praktisk talt er grunnvannet spesielt i lavvannperioder.

Grunnvannsstanden i magasinene langs vassdragene styres av elvevannstanden. Grunnvannsstanden fluktuerer i takt med elvevannstanden. Det betyr imidlertid ikke at vannet i disse magasinene stammer fra elvevann, selv med god hydraulisk kontakt mellom de to miljøer. Mesteparten av vannet består, i de fleste tilfellene, av grunnvann med lang oppholdstid. Oppholdstiden og opphavet til dette vannet avhenger av størrelsen og sammensetningen til det overliggende grunnvannsmagasinet (morene, fjell, myområder). Det kan imidlertid finnes lokale områder der grunnvannstilsiget er såpass lavt, pga av f. eks. manglende vannførende materialer eller begrenset tilsigsområde, at elva gir tilskudd til grunnvannsmagasiner nesten permanent. Det er spesielt tilfelle i sletteområder der elva renner i store meandrer og hvor vannet søker seg korteste vei, men også nedstrøms for de store vassdragene i deltaområder før elvene møter sjøen.

Utstrømning av grunnvannet kan i Rena betraktes som permanent, mens innstrømning av elvevann kun er temporært (noen få dager pr. år) og skyldes raske endringer i elvevannstanden. Det er ikke vannstanden som kontrollerer vannutvekslingen. Det finnes ikke noen faste grenser for når grunnvannet yter tilskudd til elva eller for når grunnvannsmagasinet mates av elva. Det er ikke vannivåene som er bestemmende, men raske fluktuasjoner av elvevannet.

Betydning for økologi

Kombinasjonen av stort tilskudd av grunnvann og grove og heterogene løsmasser er svært utbredt i Norge. Dette har betydning for vannkvalitet og vanntemperatur i elvas bunnsedimenter og dermed for økosystemet. Den mest åpenbare innvirkningen av grunnvannstilsig er å opprettholde vannføringen i elva. Ved lavvann er praktisk talt hele vannføringen grunnvannstilsig. Dette har derfor stor betydning for vanntemperatur, vannkvalitet og økosystemet i elva.

Modellresultater viser at endringer i grunnvannsdannelse, permeabilitet eller mektigheten av bunnsedimenter, har store konsekvenser for utvekslingsmengder og grunnvannets oppholdstid. Dette har sannsynligvis stor betydning for kvaliteten på grunnvannet inni grunnvannsmagasinet og deretter for vannet som strømmer ut i Glomma. Blanding av grunnvann inn i elvevann kan ha en stor effekt på det akvatiske miljøet hvis faktorene som surhetsgrad, temperatur og oksygeninnhold er forandret. På denne måten kan endringer i den naturlige interaksjonen mellom grunnvann og elvevann som skyldes menneskelig aktivitet (grunnvannsuttak, regulering..) ha en potensiell betydelig effekt på det akvatiske miljøet.

Kvaliteten på (temperatur, oksygen, pH) og mengder grunnvann som strømmer inn i vassdrag har, i følge Brabrand et al. (2003), direkte betydning for levevilkårene for fisk i vassdragene (gyting, rekrutteringsområder og overlevelse). Grunnvannet bidrar ikke bare til vann i elva, men også til oppløste materialer. Utstrømningen av grunnvann påvirker tilgangen til karbon, oksygen og næringsstoffer som nitrogen og fosfor (Jones and Mulholland, 2000). Grunnvannet påvirker også egenskapene til elvevannet ved å endre vanntemperatur, som innvirker på hastigheten til ulike biokjemiske prosesser. Grunnvannet er vanligvis stabilt (5-6 ^{o}C) og utstrømning av grunnvann kan beskytte fisk, bunndyr og egg i bunnen av elva mot å fryse i vinterhalvåret, og bidra til lavere temperatur om sommeren. Grunnvannsmagasinet på Rena kjennetegnes av lang vannoppholdstid og lave oksygenkonsentrasjoner. Dette kan muligens gi stor dødelighet av bunndyr, rogn og yngel (Brabrand, pers. kom.).

I dette prosjektet har vi kun analysert de fysiske prosessene som kontrollerer interaksjon mellom grunnvann og overflatevann. Vi trenger nå å koble denne kunnskapen med de biologiske parametrene. Et samarbeid mellom hydrogeologer, sedimentologer og biologer er derfor den beste måten for å få økt kunnskap om betydning av både sterkt redusert vannføring og grunnvannsuttak på det biologiske systemet.

Referanser:

Brabrand Å., Koestler A.G., Bremnes T. og Saltveit S.J., 2003. Grunnvannstilstrømning til elveavsnitt med redusert vannføring: økologisk betydning for bunndyr og fisk. In ”Statusrapport- Prosjekter Miljøbasert vannføring 2002”. Februar 2003. NVE.

Colleuille H., Pedersen T.S., og Dimakis P., 2004. Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma i Rena, Hedmark (002.Z). **Rapport 1**. Formål og metoder. NVEs rapport Miljøbasert vannføring 1-2004.

Colleuille H., Pedersen T.S., Dimakis P., og Frengstad B., 2004. Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma i Rena, Hedmark (002.Z). **Rapport 2**. Materiale og feltmålinger. NVEs rapport Miljøbasert vannføring 2-2004.

Chen X. og Shu L., 2002. Stream-Aquifer Interactions: Evaluation of Depletion Volume and Residual Effects from Ground water Pumping. Ground Water, Vol.40, Nr.3, sider 284-290.

Jones J.B. and Mulholland P., 2000. Streams and Ground waters. Academic Press.

McDonald, M.G. og Harbaugh A.W., 1988. A modular three-dimensional finite differense groundwater flow modell. U.S. Geol. Surv., Techniques of Water Resources Investigations 06-A1.

Pollock, 1994. User’s Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT,Version 3: A particle tracking post-processing package for Modflow, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model. In MODFLOW Packages Reference Manual. Waterloo Hydrogeologic.

Rohr-Torp E., 1991. Grunnvann i Åmot kommune. GiN-prosjekt, NGUs rapport 91.010.

Visual Modflow Pro User’s Manual. Waterloo hydrogeologic 2003.

Winter T.C, Harvey J. W., Franke O.L. and Alley W.M, 1998. Ground Water and Surface Water. A single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139. Denver, Colorado.

Zheng C., 1993. Extension of the Method of Characteristics for Simulation of Solute Transport in Three Dimensions. Ground Water, vol 31(3). 456-465pp.

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Utgitt i rapportserien Miljøbasert vannføring:

Nr. 1-02 Thomas Skaugen, Marit Astrup, Zelalem Mengistu og Bjarne Krokli: Lavvannføring - estimering og konsesjonsgrunnlag (28 s.)

Nr. 1-03 Eva B. Thorstad, Finn Økland, Nils Arne Hvidsten, Peder Fiske, Kim Aarestrup: Oppvandring av laks i forhold til redusert vannføring og lokkeflommer i regulerte vassdrag (51 s.)

Nr. 2-03 Per Ivar Bergan, Carsten S. Jensen, Finn R. Gravem, Jan Henning L'Abée-Lund, Anders Lamberg, Peder Fiske: Krav til vannføring og temperatur for oppvandring av laks og sjøørret (63 s.)

Nr. 1-04 Hervé Colleuille, Tor Simon Pedersen, Panagiotis Dimakis: Elv og grunnvann. Analyse av inter aksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z) Rapport 1. Formål og metoder (66 s.)

Nr. 2-04 Hervé Colleuille, Tor Simon Pedersen, Panagiotis Dimakis, Bjørn Frengstad: Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z). Rapport 2. Materiale og feltmålinger (113 s.)

Nr. 3-04 Hervé Colleuille, Wai Kwok Wong, Panagiotis Dimakis: Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z). Rapport 3. Grunnvannsmodellering (114 s.)