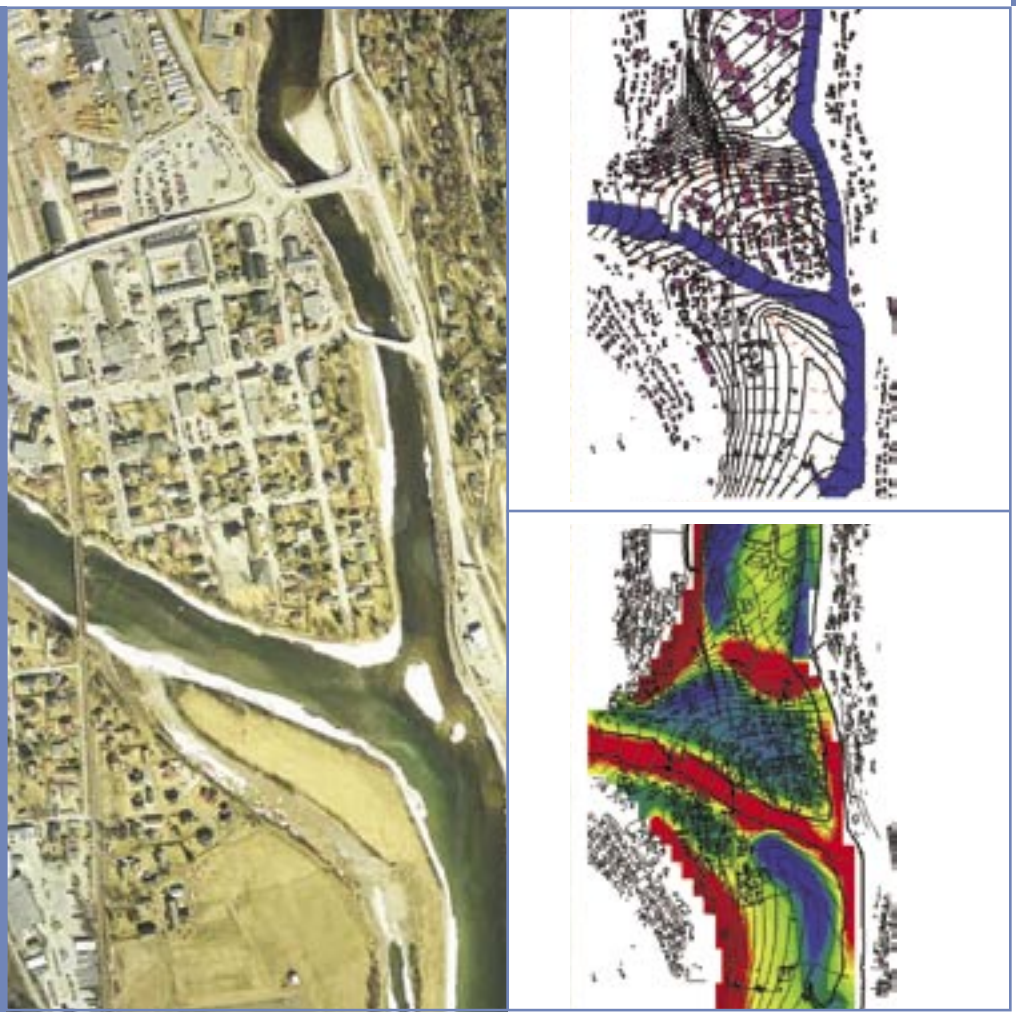
NVE

Tiltaksvurdering mot oversvømmelser i Otta sentrum

Analyse av grunnvannsforholdene ved hjelp av modellverktøy

Hervé Colleuille

12
2005



RAPPORT

Tiltaksvurdering mot oversvømmelser i Otta sentrum

Analyse av grunnvannsforholdene vha. modellverktøy

Norges vassdrags- og energidirektorat
2005

Rapport nr 12

Tiltaksvurdering mot oversvømmelser i Otta sentrum.

Analyse av grunnvannsforholdene vha. modellverktøy

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Redaktør:

Forfatter: Hervé Colleuille

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag: 50

Forsidefoto: Flybildet over Otta sentrum, grunnvannstrømningsbilder og strømningsmengder ved flom.

ISSN 1501-2832

ISBN 82-410-0548-2

Sammendrag: Denne rapporten er skrevet etter en forespørsel fra NVEs regionkontor Øst. De ønsker å vurdere tiltak for å forbedre sikring av Otta sentrum mot lokale oversvømmelser.

Et tredimensjonalt grunnvannsmodellverktøy er bygd opp og anvendt for å analysere interaksjon mellom grunnvann og overflatevann i Otta sentrum. Grunnvannsmodellen brukes bl.a. for å vurdere virkningen av ulike tiltak som senkning av elveløp, bygging av flomverk, tetning av elvebunnene og lokal utpumping av grunnvann.

Emneord: Flom, grunnvann, flomverk, tiltak, grunnvannsmodell, Sel kommune

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

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

Mai 2005

Innhold

Forord **4**

Sammendrag **5**

1 Prosjektbeskrivelse **6**

1.1 Metode 6
1.2 Formål med modellarbeid 6

2 Bakgrunnsdata **7**

2.1 Geologiske og geomorfologiske data 7
2.2 Hydrologiske data 14
2.3 Meteorologiske data 16

3 Grunnvannsmodell **17**

4 Analyser **23**

4.1 Naturlige strømningsforhold og vanninntrengningsmengder 23
4.2 Effekt av eksisterende og vurderte flomverk 27
4.3 Effekt av tetning av elvebunnene 30
4.4 Effekt av senkning av elveløp 33
4.5 Effekt av lokal utpumping av grunnvann 30

5 Konklusjon **39**

Referanser **41**

Vedlegg **42-45**

Forord

NVE, Hydrologisk avdeling, har de siste årene, studert interaksjonen mellom grunnvann og elvevann bl.a. gjennom FoU-programmet Miljøbasert vannføring. Vi har her tatt i bruk metodikk og erfaringer som ble utviklet gjennom dette FoU-prosjektet for å analysere grunnvannsforholdene i Otta sentrum i Sel kommune.

Denne rapporten er skrevet etter en forespørsel fra NVEs regionkontor Øst. De ønsker å vurdere tiltak for å forbedre beskyttelse av Otta sentrum mot oversvømmelser. Arbeidet har bestått i en gjennomgang av tidligere grunnvannsundersøkelser på Otta, og utvikling av en grunnvannsmodell for å analysere virkningen av ulike tiltak.

Grunnvannsmodeller viser seg å være instruktive hjelpemidler for å visualisere strømningsforløp og effekt av ulike tiltak, noe som er en viktig støtte for beslutningstagere.

Rapporten er utarbeidet av senioringeniør Hervé Colleuille (NVE, Hydrologisk avdeling). Senioringeniør Panagiotis Dimakis (NVE, Hydrologisk avdeling), overingeniør Naserzadeh Ahmed Reza (NVE, Region Øst) og Atle Dagestad (Norges Geologiske Undersøkelse) har lest rapporten og gitt faglige kommentarer. Vi vil benytte anledningen til å takke for konstruktive bidrag og kommentarer.

Oslo, mai 2005

Morten Johnsrud
avdelingsdirektør

Sverre Husebye
seksjonssjef

Sammendrag

Denne rapporten er skrevet etter en forespørsel fra NVEs regionkontor Øst. De ønsker å vurdere tiltak for å forbedre sikring av Otta sentrum mot lokale oversvømmelser.

Et tredimensjonalt grunnvannsmodellverktøy er bygd opp og anvendt for å analysere interaksjon mellom grunnvann og overflatevann i Otta sentrum. Grunnvannsmodellen brukes bl.a. for å vurdere virkningen av ulike tiltak som senkning av elveløp, bygging av flomverk, tetning av elvebunnene og lokal utpumping av grunnvann.

Grunnvannsmodellen er bygd opp med bakgrunn i de tilgjengelige dataene for geometri, geologi og hydrologi. Resultatene fra simuleringer viser at:

- Grunnvannsnivået i Otta sentrum er styrt av elvevannstand i Otta og Lågen. Strømningsbildet endrer seg ved raske fluktuasjoner i elvevannstand slik at elvevann infiltreres i grunnen mot Otta sentrum fra alle kanter ved flom.
- Flomverkene har begrenset effekt på grunnvannsforholdene siden mektigheten til grunnvannsmagasinet er på ca. 30 m. Strømningsbildet og grunnvannsnivået er ikke endret med de eksisterende flomverkene. Byggingen av flomverkene langs Otta og Lågen i Otta sentrum vil heller ikke forbedre grunnvannsforholdene.
- Tetning av elvenes bunnsedimenter ved Otta sentrum vil føre til en økning av grunnvannsnivået, slik at problemene med oversvømmelser blir verre enn før. Grunnvannsnivået i Otta sentrum blir f. eks. hevet med ca. 1.20 m ved å redusere den hydrauliske ledningsevnen fra 10^{-5} til 10^{-8} m/s.
- Senkningen av elveløpene (fra begge bruene og nedstrøm) vil forårsake en begrenset senkning (noen få cm) av grunnvannsnivåer nord for Otta sentrum. Et utvidet senkning i Lågen opp til profil 9 (stadion) vil ha betydelig større positive virkninger på grunnvannsnivåer i området nord for Otta sentrum.
- Lokal utpumping og drenering av grunnvannet vil kunne sikre at grunnvannet holdes på en bestemt maksimum høyde. Dette forutsetter imidlertid relativt høye uttaksmengder.

1 Prosjektbeskrivelse

Denne rapporten er skrevet etter en forespørsel fra NVEs regionkontor Øst. De ønsker å vurdere tiltak for å forbedre sikring av Otta sentrum mot lokale oversvømmelser.

Et tredimensjonalt grunnvannsmodellverktøy er bygd opp og anvendt for å analysere interaksjon mellom grunnvann og overflatevann i Otta sentrum. Grunnvannsmodellen brukes bl.a. for å vurdere virkningen av ulike tiltak som senkning av elveløp, bygging av flomverk, tetning av elvebunnene og lokal utpumping av grunnvann.

1.1. Metode

Visual Modflow er et modellverktøy for analyse av tredimensjonal grunnvannsstrømning og transport av stoffer i mettet sone. I dette arbeidet har vi tatt i bruk programmet Visual Modflow Pro (Versjon 3.1). Programmet gir mulighet til å beregne stasjonær eller tidsavhengig strømning. Modellen blir bygd opp av rektangulære celler og beregner grunnvannsnivået (potensialenergi) i hver celle, som en funksjon av de omkringliggende cellene og grunnvannsnivået i forrige tidssteg. På denne måten kan modellen simulere utvikling av grunnvannsnivået i hver celle med tiden. En beskrivelse av hvordan grunnvannsmodellen bygges opp, kalibreres og anvendes som analyseverktøy finnes i Colleuille et al. 2004 (a, c).

1.2. Formålet med modellarbeid

Grunnvannsmodellen er anvendt som støtte for å analysere virkningen av ulike tiltak på grunnvannsnivåer og grunnvannsbevegelser i Otta sentrum. Modellen er tenkt å kunne svare på følgende spørsmål:

- Hvordan virker elvevannsstand i Lågen og Otta på grunnvannsnivåer i Otta sentrum?
- Hva er de naturlige grunnvannstrømningsforholdene ved ulike årstider (høy og lav-vannføring i elvene)?
- Hva er virkningen av eksisterende forbygninger (flomverk) langs Otta og Lågen?
- Vil etableringen av nye flomverk langs Lågen og Otta forbedre situasjonen?
- Hva er effekten av en fullstendig tetting av elvene?
- Hva er virkningen av senkning av elvevannstand i elvene Otta og Lågen, og spesielt senkningen av flomløpet sør for Otta?
- Hvor mye vann må pumpes ut eller dreneres for å unngå oversvømmelsen av det utsatte området (P-plass)?

2 Bakgrunnsdata

Oppbyggingen av grunnvannsmodellen er gjort med bakgrunn i de tilgjengelige dataene for geometriske, geologiske, hydrologiske og menneskeskapte elementer i terrenget. Informasjonen er basert bl.a. på en gjennomgang av tidligere grunnvannsundersøkelser utført i Otta sentrum

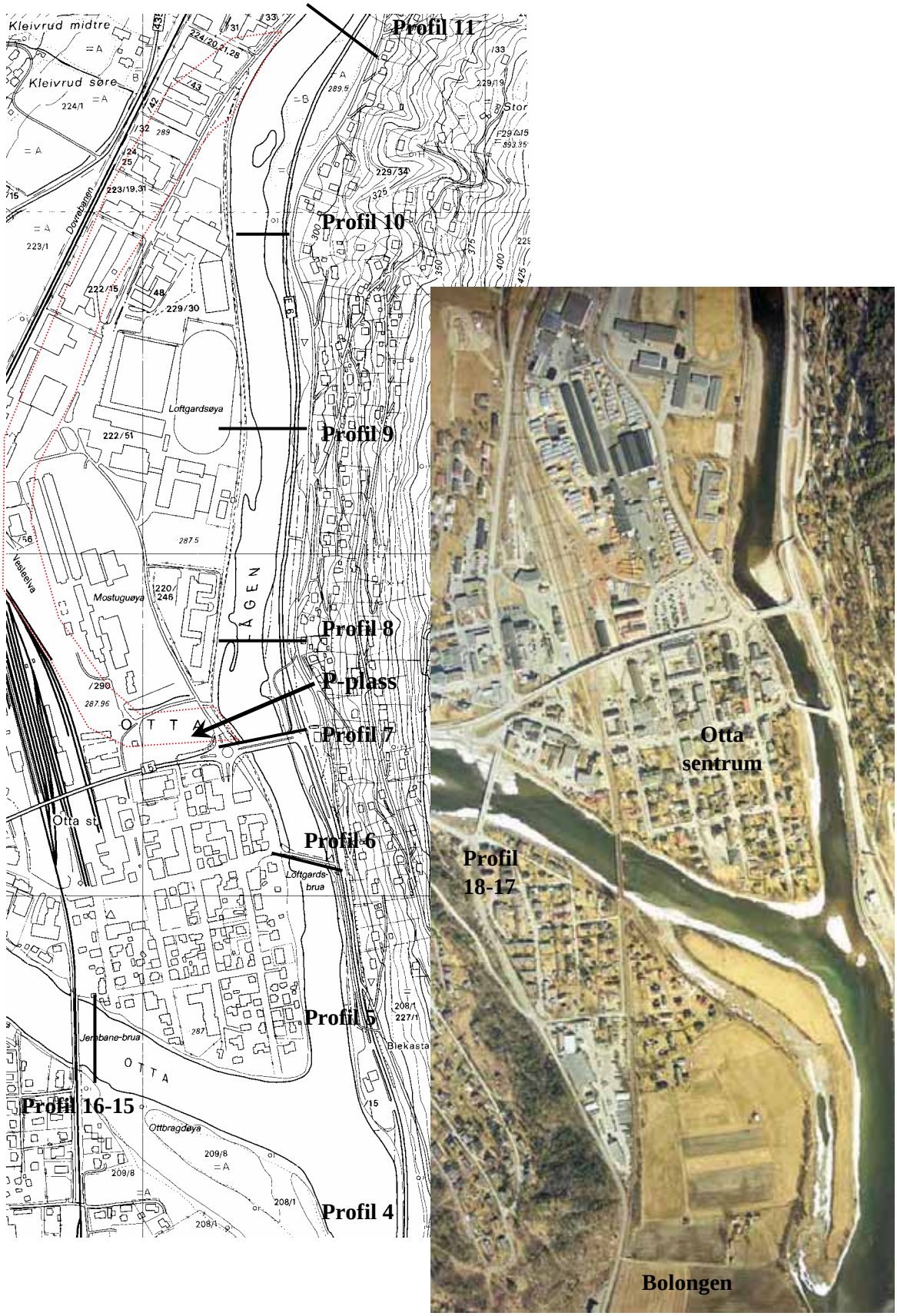
NVE satte i gang grunnvannsobservasjoner på Otta i 1963 for å kartlegge grunnvannsforholdene før utbyggingen av Otta- og Lågen vassdraget. I 1998 skrev NVE en rapport på oppdrag fra Glommens og Laagens Brukseierforening (GLB), som ønsket å forenkle grunnvannsmålingene i nærheten av samløpet til Otta og Lågen. En oversikt over målestasjonenes beliggenhet og måleperioder fra aktive og nedlagte grunnvannsinstallasjoner i området Otta sentrum er presentert i tidligere rapporter fra NVE (Renshusløkken, 1968; Pedersen, 1996; Pedersen og Colleuille, 1998).

I 1996 ble det bygd en enkel grunnvannsmodell (ASM) for bl.a. å analysere virkninger av isoppstuving på grunnvann ved Otta (Wong et al. 1996). Modellen viser tydelig at grunnvasstrømning i elveslettene i Otta-området hovedsakelig styres av vannstandene i Otta og Lågen. Analyser av resultater viser også at menneskelige inngrep som forbygning kunne ha en positiv innvirkning på grunnvannsstrømning og grunnvannsnivåer vinterstid. Modellen som ble bygd (2D modellen, stasjonære forhold) kunne imidlertid ikke fange opp dynamikken i samvariasjonen mellom grunnvannsstand og vannstand i elver.

Gjennom et samarbeidsprosjekt mellom NVE og NGU ble det på oppdrag fra Sel kommune i 2000 gjennomført ulike geologiske undersøkelser for å kartlegge potensialet for uttak av grunnvarme fra løsmasser i Otta sentrum. I denne forbindelse ble det utført både grunnboring og georadarundersøkelser.

2.1. Geologiske og geomorfologiske data

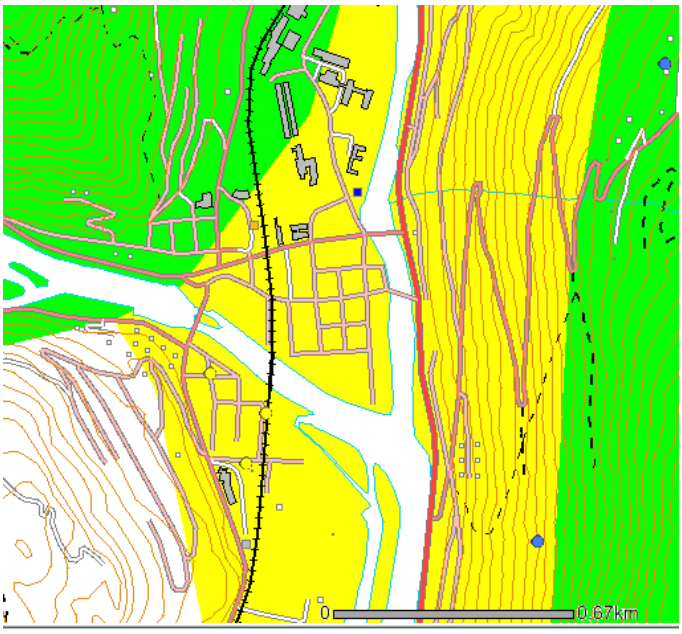
Løsmassefordelingen i Otta sentrum består av glasifluviale avsetninger, vesentlig sand og grus, med en mektighet over 30 meter (tabell 1). Tolkningen av georadarprofilene indikerer at forekomsten av mektige grovkornede lagdelte sedimenter hovedsakelig finnes på nordsiden av Otta fra munningen av Ottadalen og ned mot Elvebakken ved Lågen Materialer i Otta sentrum utgjør nedre del av en stor løsmassevifte (deltaavsetning fra Otta) som er avgrenset mot nord av tettere masser (Pers. kom. Atle Dagestad, NGU). Det er ut fra georadarundersøkelser antatt at de grovkornete massene blir mer finkornige mot Bolongen/Otbragden i sør. Studien av flybilder og topografiske kart indikerer tydelig forekomsten av flere gamle flomløp nord for Otta sentrum og sør for Otta ved samløp med Lågen (figur 1) som omrisser flere tidligere øyer (Mostuguøya og Loftgardøya i Nord) og Ottbragdøya sør for Otta. Disse øyene antas å bestå av finere materialer (fin sand- se profil 2). På elvesletter har elva ofte skiftet løp gjennom tidene. Gamle gjengrodde løp og grovere elvekanaler kan være dekket av yngre elveavsetninger.



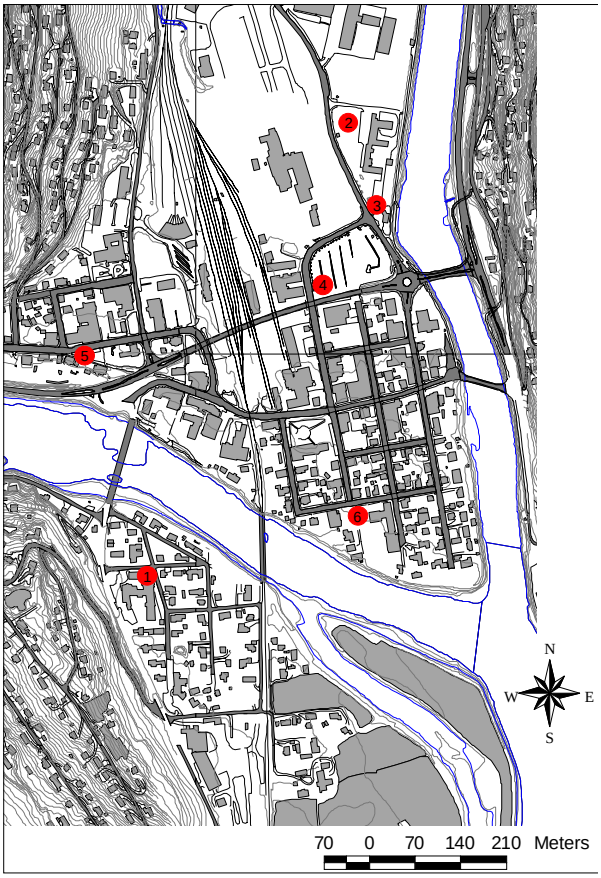
Figur 1. Oversiktkart og flybildet over Otta sentrum.

Boring nr og navn	Dybde	Materialtype	Kommentarer
1. ved Selsro	0-4 m	Stein, grus og sand	Antatt fjell på 4 m
2. ved Elvebakken	1-8 m **8-17.7 m**	Sand og grus **Sand og finsand**	
3. Undersøkelsesbrønn 3	0-17 m 17-29 m 29-31.7 m	Sand og grus Sand med gruslag Finsand, siltig	Avsluttet 32 m uten å påtreffe fjell. 18 m rør står igjen
4. På parkeringsplass	0- 8 m 8-14 m 14- 30 m 30-33.7 m	Stein, grus, sand Sand og grus Grusig sand Finsand, hardpakket	Sandspiss brakk på 8 m dyp.
5. ved Nordlandia Otta hotell	0-9 m 9-12m 12-27.5 m	Sand og grus Grusig sand Sand og grus	Antatt fjell fra 28 m 26 m rør står igjen
6. ved Otta barneskole	0-12 m 12- 16 m 16-33 m 33-35 m 35-37.7 m	Sand og grus Grusig sand Sand, noe grusig Stein og grus Sand og finsand	Avsluttet uten å påtreffe fjell 30 m rør står igjen
Løsmassebrønn nr 8953 Sør for Otta elv (pkt som mest ligger sørøst i fig. 2 ved brønn Einangen)	0-6 m **6-12 m** 12-29.7 m	Stein og blokk Sand og **finsand** Grus	”5/4” damprør
Løsmassebrønn nr 8951 Sør for Otta elv	0-15 m 15-30.7 m	Stein og grus Grus	”5/4” damprør. Røret stoppet opp på ca. 28 m
Løsmassebrønn nr 8952 Sør for Otta elv	0-8 m 8-19 m 19-31.7 m	Stein og blokk Grusig sand Grus	”5/4” damprør. Røret gikk av på ca. 15 m

Tabell 1. Oversikt over dybde og materialer ved sonderboringer utført av NGU i 2000.



Figur 2. Løsmassekart over Otta (elveavsetning i dalen med morenematerialer på sidene). Lyse punkter sør for Otta er løsmassebrønner 8951-52-53 (tabell 1). Hentet fra NGUs database GRANADA.



Figur 3: Lokalisering av sonderboringene utført av NGU i 2000 ved Otta sentrum (Internt notat NGU).

Egenskaper til grunnvannsmagasin
Det brukes her som inputdata kornfordelingsanalyser utført av NGU til å avlede den mettede hydrauliske ledningsevnen. Figur 3 viser resultatene fra kornfordeling av prøver presentert i rekkefølge ut fra prosentandel av sand og grus. Bratte kurver indikerer godt sorterte materialer, mens flate kurver indikerer at materialer består av ulike kornstørrelser og derfor er dårlig sortert. Hvor godt sedimentene er sortert kan også vurderes fra sorteringsindeks C_u (tabell 2):

$C_u = d_{60}/d_{10}$

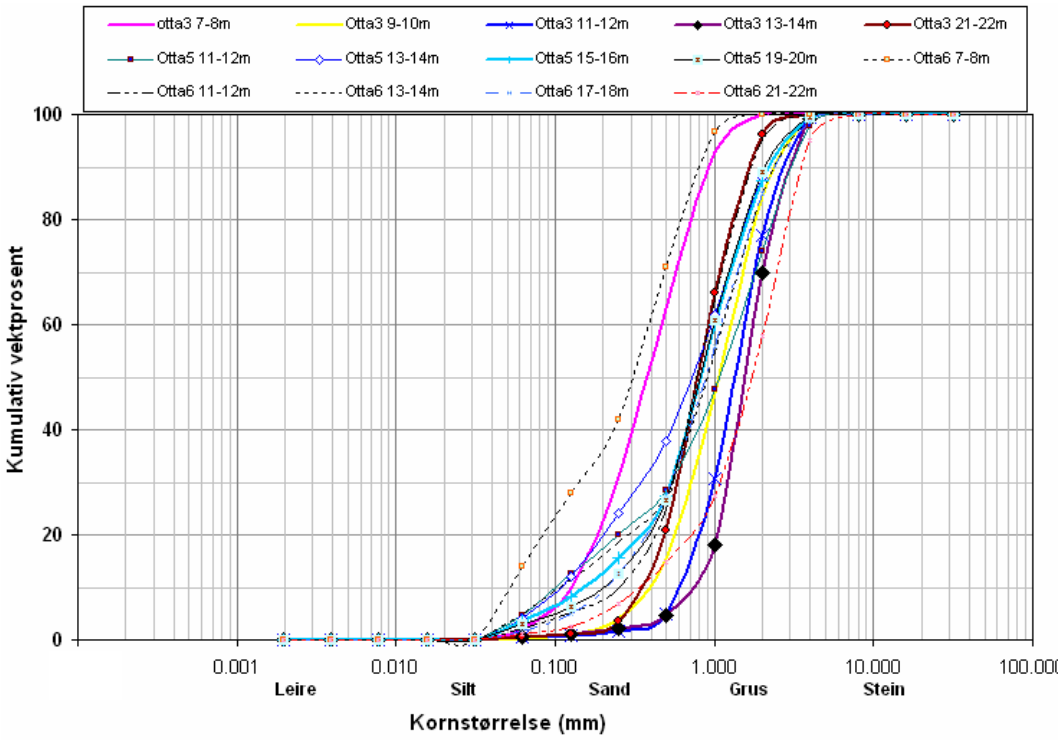
hvor d_{10} er kornstørrelsen for 10 vektprosent og d_{60} for 60 vektprosent.

En prøve med C_u mindre enn 4 karakteriseres som godt sortert og større enn 6 dårlig sortert.

	Dybde i m	**Beskrivelse ved sonderboring**	**$C_u = d_{60}/d_{10}$**
Otta 3	7-8	Sand og grus	4
Otta 3	9-10	Sand, noe grusig	3
Otta 3	11-12	Sand, noe grusig	2
Otta 3	13-14	Sand, noe grusig	2
Otta 3	21-22	Sand	3
Otta 5	11-12	Grusig sand	11
Otta 5	13-14	Sand og grus	10
Otta 5	15-16	Sand og grus	7
Otta 5	19-20	Sand og grus	5
Otta 6	7-8	Sand, noe grusig	7
Otta 6	11-12	Grusig sand	4
Otta 6	13-14	Grusig sand	11
Otta 6	17-18	Sand	5
Otta 6	21-22	Sand, noe grusig	3

Tabell 2. Sorteringsgraden til prøver tatt og analysert av NGU i 2000.

Figur 4. Kornfordelingskurver av prøver tatt på Otta i 2000 av NGU.



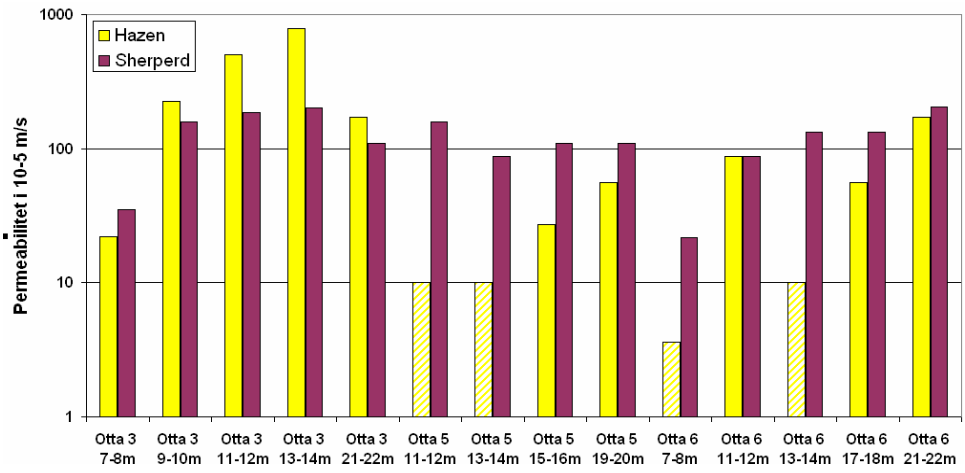
Hydraulisk ledningsevne (K)

Hydraulisk ledningsevne er et mål for avsetningens evne til å slippe gjennom vann. Tette masser (silt og leire) har lave K verdier (10^{-10} og 10^{-6} m/s) mens grovere masser (godt sortert sand og grus), slik vi finner på Otta sentrum, kan ha K verdier som varierer fra 10^{-5} m/s (fin sand) til 10^{-2} m/s (se tabell 3).

	K i m/s
Leire	$10^{-11} – 10^{-8}$
Silt, sandig silt	$10^{-8} – 10^{-6}$
Siltig sand, fin sand	$10^{-7} – 10^{-5}$
Godt sortert sand	$10^{-5} – 10^{-3}$
Godt sortert grus	$10^{-4} – 10^{-2}$

Tabell 3. Representative verdier for ukonsoliderte løsmasser i m/s (Fetter, 1994)

Hydraulisk ledningsevne til sandige sedimenter estimeres fra kornfordelingskurver ved hjelp av empiriske formler. Metoden er beskrevet i Colleuille og al. (2004b).



Figur 5. Estimert mettet hydraulisk ledningsevne angitt i 10^{-5} m/s ut fra Hazens likningen[1] og Gustafsons likningen.

	Dybde i m	d10 mm	d50 mm	d60 mm	d60/d10	K Hazen 10^{-4} m/s	K Gustafsson 10^{-4} m/s
Otta 3	7-8	0.13	0.40	0.48	4	*2.2*	3.5
Otta 3	9-10	0.40	1.00	1.20	3	22.4	15.9
Otta 3	11-12	0.60	1.10	1.15	2	*50.4*	18.6
Otta 3	13-14	0.75	1.15	1.18	2	78.8	20
Otta 3	21-22	0.35	0.80	0.90	3	17.2	11
Otta 5	11-12	0.10	1.00	1.10	11	*1*	15.9
Otta 5	13-14	0.10	0.70	1.00	10	*1*	8.9
Otta 5	15-16	0.15	0.80	1.00	7	2.7	11
Otta 5	19-20	0.20	0.80	1.00	5	5.6	11
Otta 6	7-8	0.06	0.30	0.40	7	*0.36*	2.2
Otta 6	11-12	0.25	0.70	0.90	4	8.75	8.8
Otta 6	13-14	0.10	0.90	1.05	11	*1.0*	13.3
Otta 6	17-18	0.20	0.90	1.05	5	5.6	13.3
Otta 6	21-22	0.35	1.17	1.20	3	17.1	20.5

Tabell 4. Estimering av avsetningens hydrauliske ledningsevne ut fra kornstørrelse-fordeling av prøver tatt av NGU på Otta.

[1] Metode 1911. K-verdiene angitt i kursiv tilfredsstiller ikke kravene satt for å bruke Hazens likning. Hazen kan kun anvendes når d10 er mellom 0.1 og 3 mm.

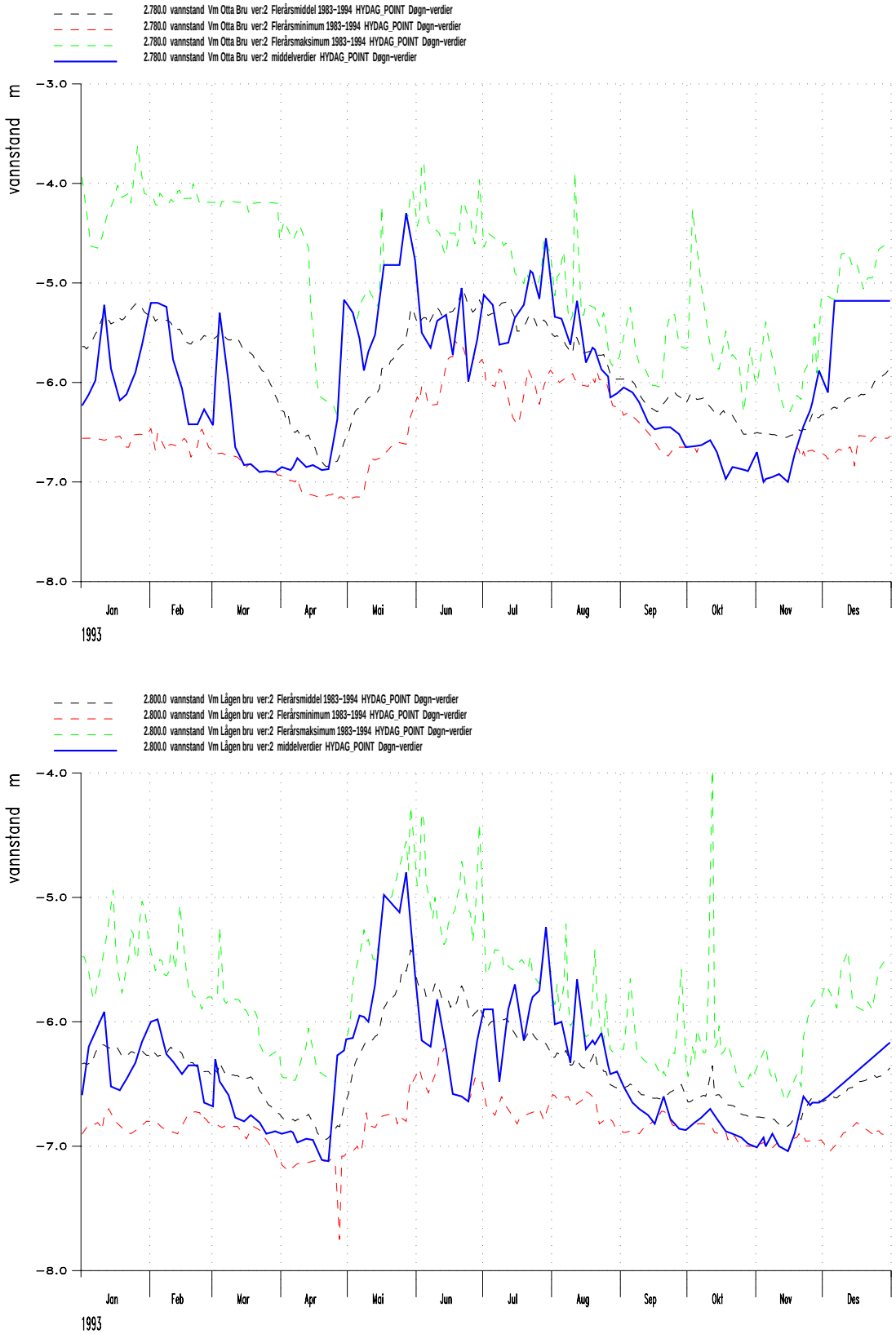
Det er viktig å understreke her at disse resultatene er representative for de meste permeable lagene av grunnvannsmagasinet, fordi prøvene nettopp er tatt i de grovere lagene.

2.2. Hydrologiske data

Rapportene om flomsonekartprosjektet på Otta (Drageset, 2000; Høydal, 2000) viser at det er Otta som har størst vannføring og derfor sannsynligvis størst påvirkning på endringer i grunnvannsstand. Det er vårflommene som dominerer både i Otta og Lågen, men Lågen har gjerne sin vårflom i begynnelsen av juni, mens Otta kommer med flom i begynnelsen av juli. Tabell 6 inneholder derfor tilhørende vannføring i Otta når Lågen er i flom og motsatt.

	Flomvannføring i Lågen før samløp med Otta	**Tilhørende vannføring i Otta ved flom i Lågen**	**Flomvannføring i Lågen etter samløp med Otta**	**Flomvannføring i Otta**	**Tilhørende vannføring i Lågen ved flom i Otta**
Middelflom	411	531	924	684	258
100års-flom	832	888	1720	1198	522

Tabell 6. Kulminasjonsvannføring ved middelflom og 100års-flom (etter Høydal, 2000)



Figur 6. Midlere, maksimum og minimum vannstand målt på Ottabrua (øverst) og Lågenbrua (nederst) i Otta sentrum perioden 1983-1994, samt observert vannstand i 1993 (Simuleringsperioden).

Samspill mellom grunnvann og elvevann
Variasjoner i elvevannsstand forårsaker samsvarende variasjoner i grunnvannstand som antyder god kommunikasjon mellom elvene og grunnvannsmagasinet. Dette kan påvises kvantitativt ved regresjonsanalyser, noe som er presentert i Colleuille og Pedersen (1996). I NVEs rapport 14-1998 er det forsøkt å gi et bilde av grunnvannstrømningsforhold ved høy og lav vannføring i februar, april og juni ut fra gjennomsnittlige månedlige observerte vannstander i perioden 1983-95. Kartene som er presentert viser at grunnvannstanden ved Otta sentrum ligger lavere i grunnvannsmagasinet enn i elver og derfor strømmer vannet mot grunnvannsmagasinet over hele området og i alle studerte perioder. Strømningsmønsteret er ikke homogent, og det finnes betydelig foretrukket strømning i sonen sør for Otta sentrum. I Otta sentrum strømmer vannet både fra Otta og Lågen mot sentrum (brønn Ysteriet og Tangen). Høydeforskjellen mellom elvevannstand og grunnvannstand i grunnvannsmagasinet er større ved høy vannføring i elvene enn ved lav vannføring. Dette fører til at jo større elvevannføringen er, jo større er vanninntrengningen i elveslettene. Vannets hastighet er proporsjonal med den hydrauliske gradienten (forskjellen mellom vannstandene observert ved to punkter) og omvendt proporsjonal med avstanden mellom de to aktuelle punktene. Hovedstrømningsmønsteret forblir omtrent det samme over de 4 studerte periodene, men vanninntrengningen fra Otta mot sør er betydelig større ved høy vannføring i juni enn i andre perioder.

2.3. Meteorologiske data

Årlig nedbør på Otta er 375 mm/år (stasjon Otta – Bredvangen for årene 1970 – 1979, 285 m o.h.). Nedbørsstasjonen på Sjoa som ligger høyere enn Otta (330 m.oh.) registrerer 448 mm/år for årene 1986 – 2000.

Avrenning for Otta-området i perioden 1961-1990 er gitt i tabell 8. Avrenningen viser hvor stor del av nedbøren som faller i løpet av ett år som renner ut i vassdragene (Beldring et al., 2002). Denne verdien gir også grov estimat av grunnvannsdannelse, siden det kan antas at 80-90 % av nedbøren ofte vil infiltrere først i jorda før den renner som overflatevann.

Referanseperioden	**Årsavrenning l/s.km^2**	**Årsavrenning mm/år**
1961-1990	6.5	200

Tabell 8. Årsavrenning for Otta-området i perioden 1961-1990.

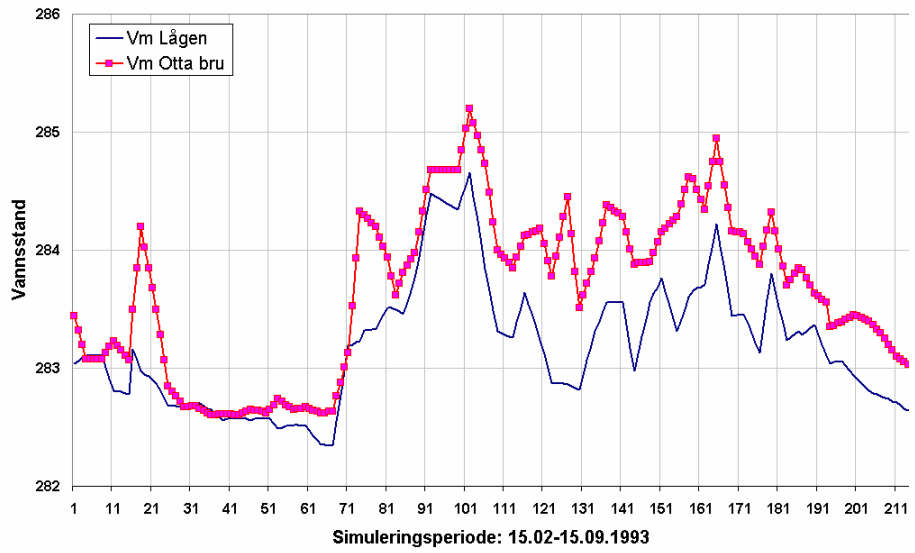
3. Grunnvannsmodell

Ved oppbygging av modellen er informasjon om geologi, hydrologi og meteorologi 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. Modellen må imidlertid tilnærme seg nok av den hydrogeologiske kompleksiteten til at modellen kan reprodusere systemets oppførsel.

I en numerisk modell er interesseområdet presentert som celler oppdelt i et gridnett. For hver celle bestemmer modellen blant annet grunnvannshøyde og vannfluks. Generell informasjon om oppbygging av modell og kalibrering finnes i Colleuille et al. 2004 og vil derfor ikke presenteres her.

Av mangel på en digital terrengfil er høyden på elvesletteoverflaten i modellen satt til 287 m.o.h. Mektigheten til grunnvannsmagasinet er antatt å være 30 m, og dermed ligger den nederste grensen til modellen på 257 m.o.h. Løsmasseavsetningene på Otta består av flere forskjellige lag med varierende utbredelse og tykkelse. Virkeligheten er imidlertid så komplisert at strømningsmodellen kun er bygget opp med 2 lag og 3 soner med ulike hydrauliske ledningsevner og porøsiteter (Tabell 10 og figur 8).

Grunnvannsmodellen er kalibrert med transiente simuleringer for en periode fra 15.02 til 15.09.1993. Perioden som ble valgt representerer et år med litt høyere vårflom enn et normalt år (figur 6). Simuleringer kjøres med døgndata (213 dager) ved bruk av interpolerte manuelle observasjoner for vannstand i Otta og Lågen. Modellen er kalibrert mot ca. 330 observasjoner av grunnvannsstand målt i 1993 i Otta (se lokaliseringen av brønnene i vedlegg 3). Det er lagt vekt på å kalibrere modellen mot observasjoner av vannivåer i Otta sentrum (Åboen, Ysteriet, Tangen og sør for Otta på Einangen). Kalibrering er utført delvis automatisk ved bruk av justerbare parametere for hydraulisk ledningsevne, magasinkoeffisient og spesifikke ytelser.



Figur 7. Manuelle observasjoner av vannstand målt på Otta brua og Lågen brua i perioden 15.02 til 15.09.1993.

I grunnvannsmodellen brukes modulen ”River Boundary Conditions” som simulerer interaksjon mellom overflatevann og grunnvann gjennom en lekkasje i bunnsedimenter (se Colleuille et al., 2004c). Denne modulen krever for hver celle i elvene informasjon om elvevannstand i m o.h., høyden til elvens bunn og strømningsmotstand mellom grunnvannsforekomsten og elvevannet. Strømningsmotstandsparameteren er en funksjon av hydraulisk ledningsevne og mektigheten til bunnsedimenter. Det er her valgt å bruke en konstant mektighet over bunnsedimenter på 1 m både i Otta og Lågen, samt en konstant vanndyp på 6 m. Etter flere tester har vi valgt å bruke en konstant hydraulisk ledningsevne for bunnsedimentene lik 10^{-5} m/s i både Otta og Lågen.

NVE har gjennom flomsonekartprosjektet (Høydal, 2000) utført nivelleringsmålinger i elver som blir brukt her for å fastsette vannstandene i modellen. I modellen settes elvevannsnivåer i hver celle på grunnlag av gradienten i elvene, ved å anta en lineær relasjon mellom hver tverrprofil hvor elvevannstand er målt i Otta og Lågen (Tabell 7).

	Gradient ved middelflom
Otta profil 19-18 (Otta bru)	-0.58
Otta profil 18-15	-0.50
Otta profil 15-4	-0.43
Lågen profil 11-9	-1.9
Lågen profil 9-6 (Lågen bru)	-1.30
Lågen profil 6-4	-0.47
Lågen profil 4-1	-1.39

Tabell 7. Beregnet gradient mellom profilene som implementeres i modellen.

Vannstanddataene fra vannmerke Camping ved Bolongen er av for dårlig kvalitet til å kunne anvendes. Data fra Otta brukes derfor for å beregne vannstand på alle profiler langs Otta og nedenfor samløp mellom Otta og Lågen. Dette introduserer en feil i vannstandene nedstrøm samløp mellom Otta og Lågen, noe som gjør at grunnvannstandene ikke blir helt riktig.

Naturlig infiltrasjon gjennom terrengoverflaten og tilsig fra overliggende felter

Naturlig infiltrasjon gjennom terrengoverflaten ved nedbør og snøsmelting, samt tilsiget fra overliggende fjellområde, simuleres med fluksbetingelser, de såkalte ”Recharge”-betingelser. Fluksen i disse cellene angis i mm/år. De kan endre seg ved transiente simuleringer, men vi har valgt å kjøre en modell med konstant ”recharge”. Ut fra dette kan vi anta at i gjennomsnitt vil rundt 50 % av nedbøren (200 mm/år) kunne mate elveslettene på Otta. Denne størrelsen er veldig usikker pga. sesongvariasjoner og menneskelige inngrep (gravde brønner, grøfter, asfalterte områder etc..). Grunnvannstilsigmengder fra overliggende felt er estimert ut fra de aktuelle arealene og ved å anta en effektiv nedbør på 200 mm/år (se vedlegg 1).

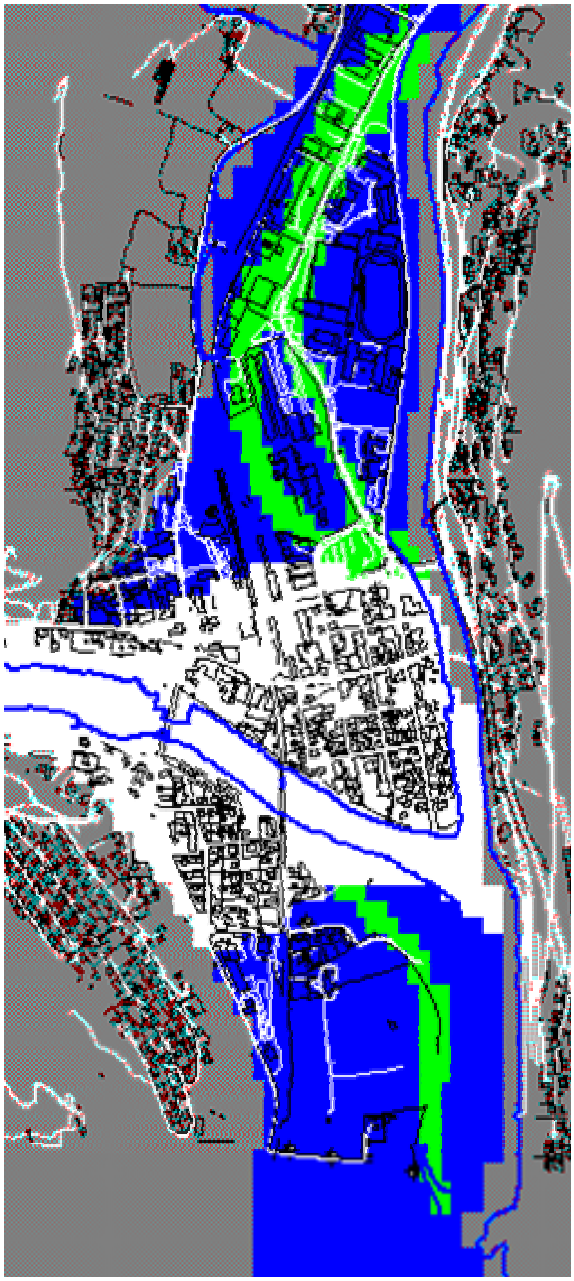
Kalibrering og Følsomhet

Kalibrering utføres for å finne et parametersett som best reproduserer observasjoner. Pga mange parameter er løsningen ikke unik. Pga. stramt tidsskjema har vi ikke testet alle muligheter og antatt en del enklere hypoteser angående struktur og egenskaper til grunnvannsmagasinet og bunnsedimenter.

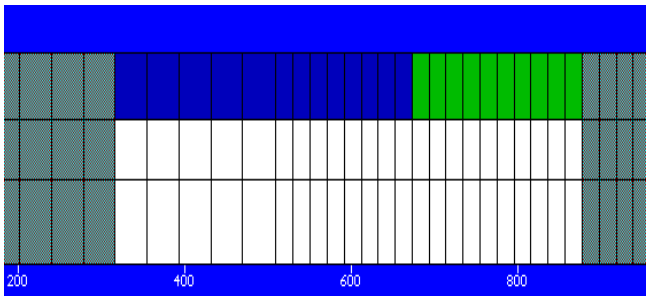
Tabell 10 viser parametrene som er brukt videre i analysen. Figur 8 viser områder satt med ulike hydrauliske ledningsevner i det øverste laget i modellen.

		Ks	sy
Sone 1 Lag 1 og 2	Hovedmagasin Deltaavsetning fra Otta	Kx = 5 10^{-5} m/s Ky = 5 10^{-5} m/s Kz = 5 10^{-6} m/s	0.04
Sone 2 Lag 1	Finere sediment i den øverste delen av grunnvannsmagasinet, nord og sør for Otta sentrum	Kx = 1 10^{-5} m/s Ky = 1 10^{-5} m/s Kz = 1 10^{-6} m/s	0.0001
Sone 3 Lag 1	Kanaler med høy hydraulisk ledningsevne (gruslag)	Kx = 5 10^{-2} m/s Ky = 5 10^{-2} m/s Kz = 5 10^{-3} m/s	0.005

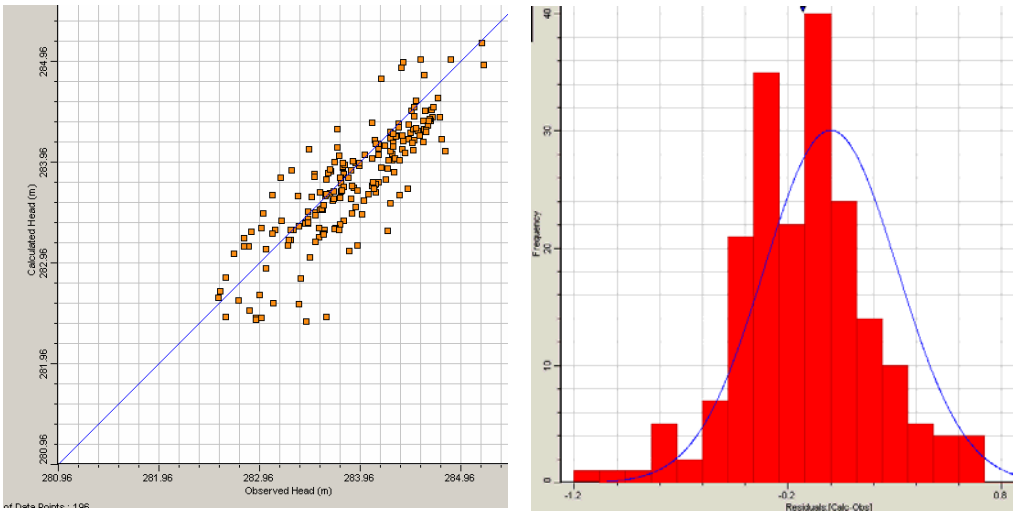
Tabell 10. Verdier for hydraulisk ledningsevne (K) og spesifikk ytelse (sy) brukt ved analyser i lag 1 (287- 276 m o.h.) og lag 2 (276-251 m o.h.).



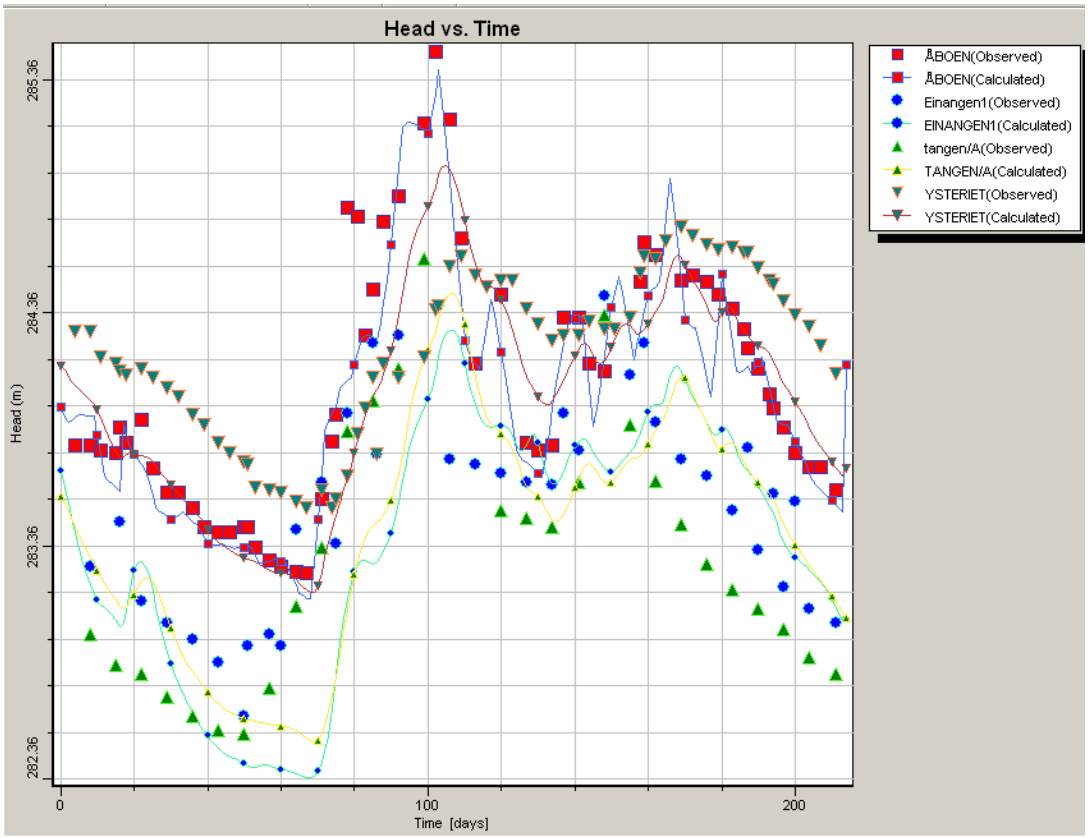
Zone	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]
1	5E-5	5E-5	5E-6
2	1E-5	1E-5	1E-5
3	0.05	0.05	0.005



Figur 8. Soner med ulike hydrauliske ledningsevner i lag 1. De grå sonene på begge sider av dalene er inaktive celler.



Figur 9. Observerte vs. simulerte grunnvannsnivåer i Otta sentrum i simuleringsperioden (15.02-15.09 1993). Histogram for residualer (differanse mellom estimerte og observerte grunnvannsnivåer).



Figur 10. Observerte og simulerte grunnvannsnivåer i Otta sentrum i simuleringsperioden.

Figur 9 viser estimerte grunnvannsnivåer vs. observerte grunnvannsnivåer for Otta sentrum (4 observasjonsbrønner -se kart i vedlegg 3-, 196 målepunkter[2]). En ser fra figuren at punktene ligger forholdsvis samlet langs linjen, noe som tyder på relativt bra kalibrering.

Den gjennomsnittlige verdien for residualene (differansen mellom estimerte og observerte grunnvannsnivåer) er på 0.12 m, standardavvik (RMS) på 11 %. Av figur 9 ser man at residualene følger normalfordelingen.

Tidligere modelleringer (Colleuille et al. 2004) og resultater fra Otta-modellen viser at grunnvannsnivåene er veldig følsomme for elvevannstand, men at økningen i elvevannstand imidlertid har liten betydning for vannutvekslingsmengde mellom grunnvannsmagasinene og elvene. Følsomhetsanalyser viser også at modellen er lite følsom for endringer i hydraulisk ledningsevnen eller mektigheten til elvenes bunnsedimenter. Endring i egenskapene til bunnsedimenter har derimot stor betydning for vannbalanse og utvekslingsmengde mellom grunnvannsmagasinet og elvene. Modellen er til slutt lite følsom for tilsigsmengde fra overliggende felt.

Modellen må regnes som litt mer usikker for området ved Bolongen (se vedlegg 3), noe som skyldes dårlig inputdata om vannstand i Lågen sør for Otta, og muligens komplisert struktur i avsetninger.

.

[2] I vedlegg 3 presenteres resultatene fra kalibreringen med alle observasjonsbrønner.

4. Analyser

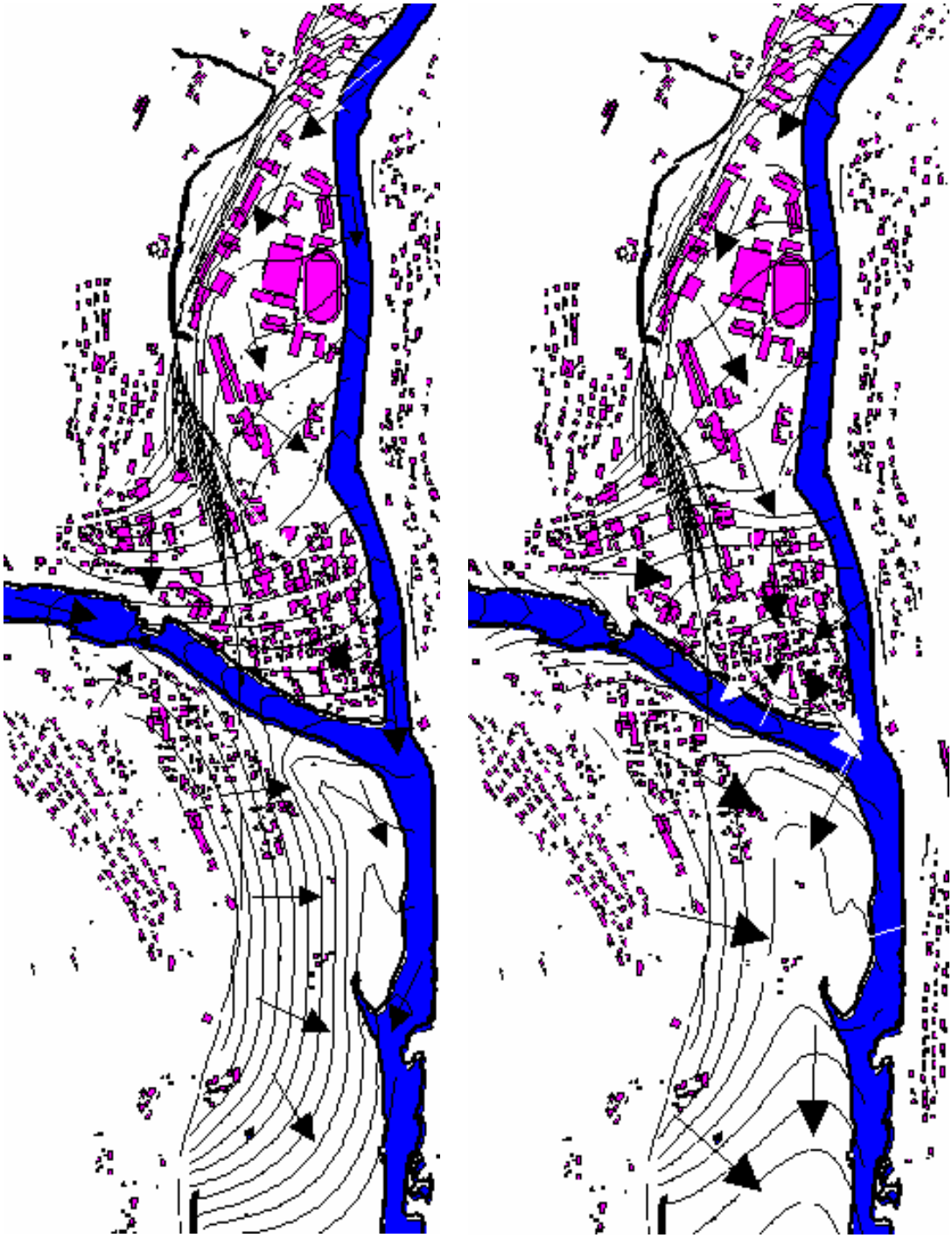
Modellen anvendes til å evaluere virkningen av ulike tiltak for å forbedre sikring av Otta sentrum mot inntrengning av vann i grunnen og på følgende oversvømmelser. Vi analyserer først naturlige variasjoner i strømningsforhold og vanninntrengning fra elvene i løpet av året 1993, deretter effekt av eksisterende og vurderte flomverk, effekt av senking av elveløpene sør for Otta, effekt av tetning av elvebunnene og til slutt effekt av utpumping av grunnvann ved det utsatte området.

4.1 Naturlige strømningsforhold og vanninntrengningsmengder

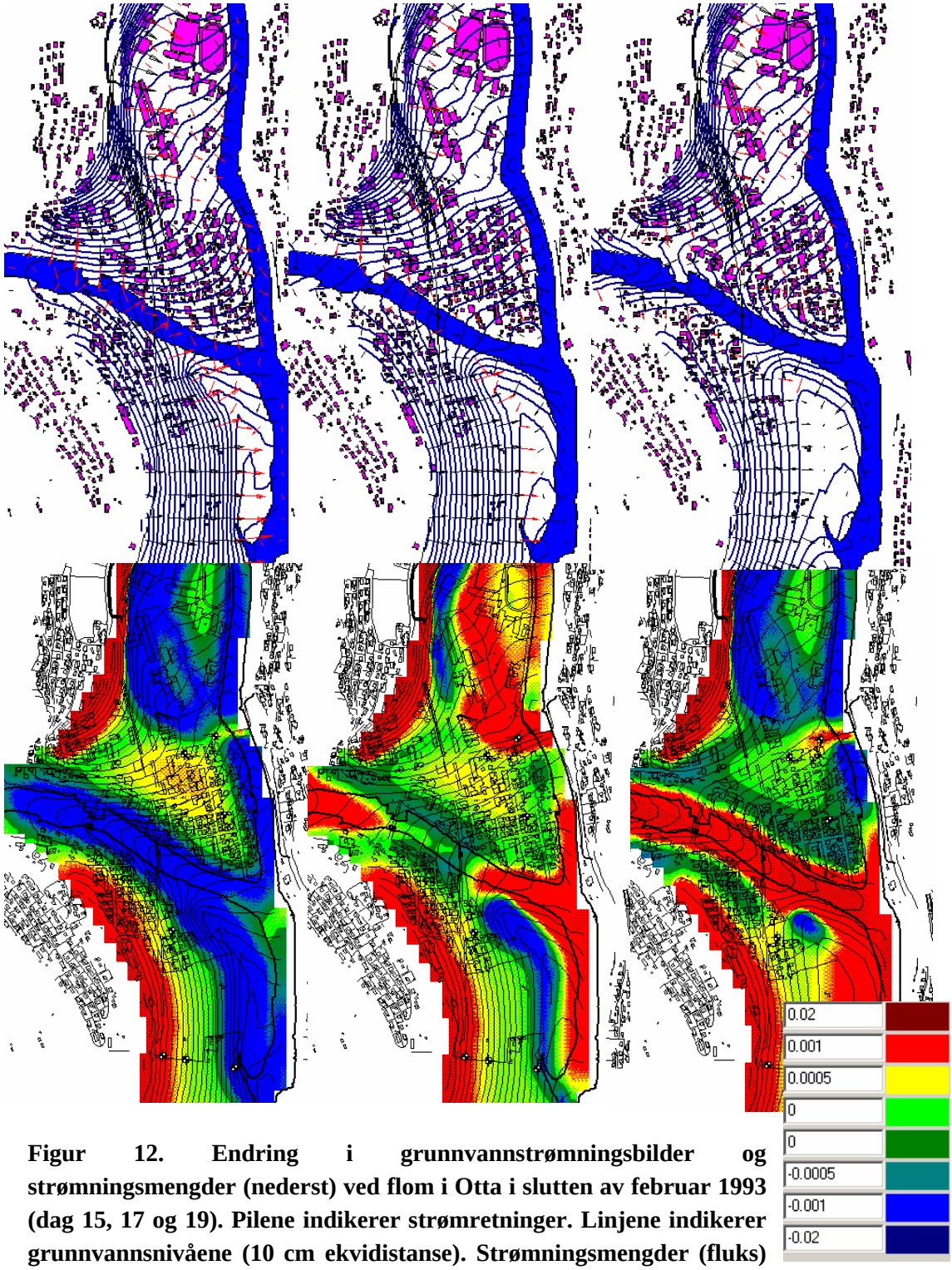
Resultatene fra modellarbeidet viser at grunnvannsnivåene varierer kraftig i takt med elvevannstandene, og at strømningsbildet endret seg på enkelte områder i løpet av simuleringsperioden. Det registreres ikke noen spesielle endringer mellom normal vannføring og lavvannføring. Figur 11 viser at elvevann infiltreres i grunnen nord for Otta sentrum (sør for Nordre Kleivrud), og strømmer ut i Lågen ved Otta sentrum øst for P-plassen.

Det er kun ved raske endringer av elvevannstand (flom) at strømningsbildet endrer seg kraftig i Otta sentrum. Dette skjer både for små flommer om vinteren (figur 12) og for vårflom (figur 13). Det er raske fluktuasjoner i elvevannstand som viser seg å kontrollere vannutvekslingsmønster og -mengder mellom elvene og grunnvannsmagasinet. Gradienten mellom grunnvannet og overflatevannet styrer vannutvekslingen: Når grunnvannstanden er høyere enn elvevannstanden, strømmer grunnvannet mot elvevannet. Videre når elvevannstanden er høyere enn grunnvannstanden, strømmer elvevannet inn i grunnvannsmagasinet. Som vist i figur 7 forekommer flommer i Otta og Lågen ikke nødvendigvis på samme tidspunkter, noe som forårsaker en ubalanse i grunnvannsmagasinet og endringer i strømningsbildet.

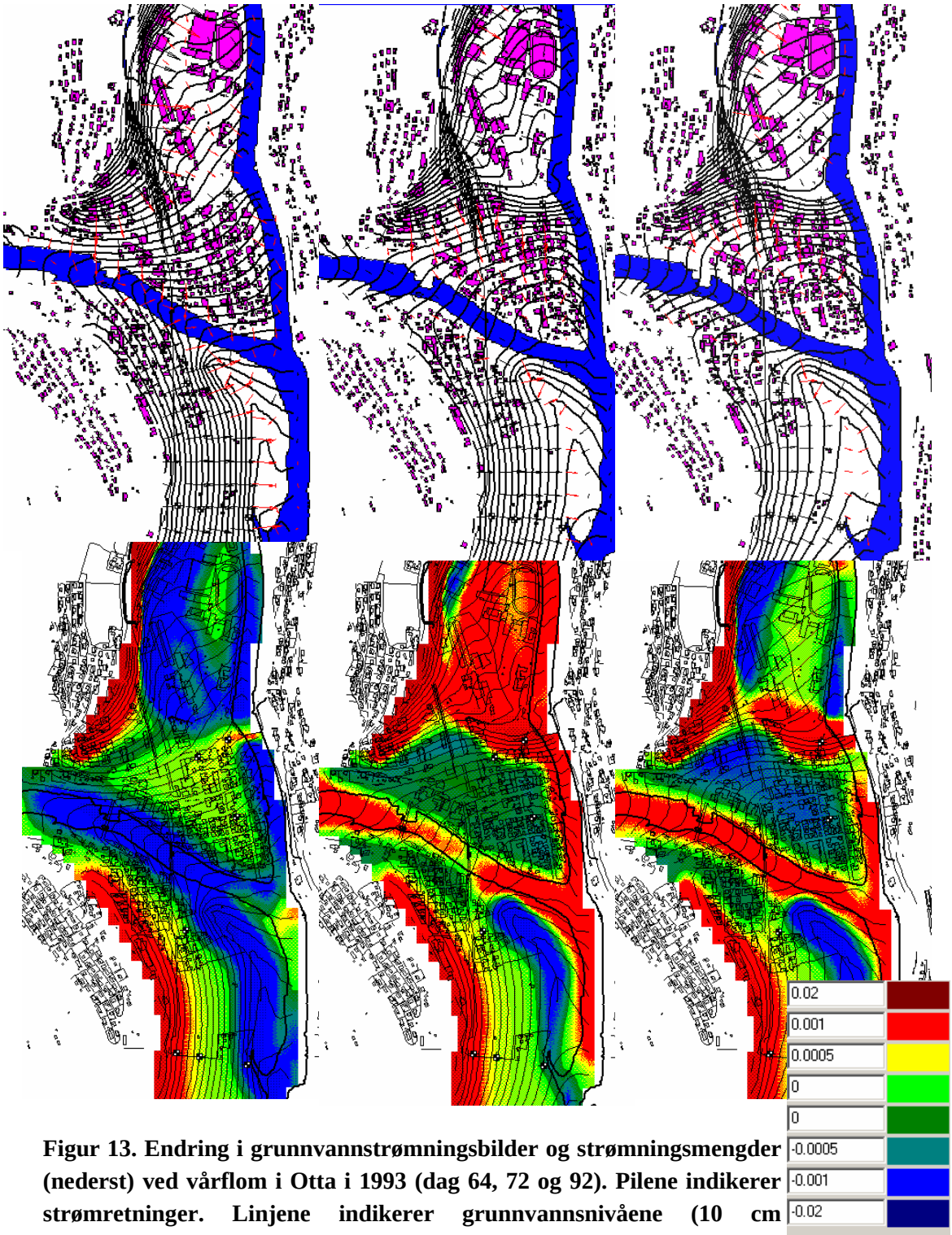
En av de viktigste endringene ved flom er at elvevann trenger inn i grunnvannsmagasinet fra alle kanter mot Otta sentrum. Denne prosessen varer noen få dager, men kan gjentas flere ganger ved større flom (vårflom): endringer skjer så lenge overflatevannet stiger fortere enn grunnvannet. Mesteparten av vannmengden som strømmer inn i grunnvannsmagasinet, går tilbake til elvene når vannstanden synker igjen. Hvis elvevannet er så høyt at en del av elvesletta blir oversvømt, vil tida det nydannete grunnvannet går tilbake til elva bli lengre, fordi grunnvann beveger seg langsommere enn overflatevann.



Figur 11. Grunnvannstrømningsbilder ved normal vannføring (venstre: dag 45: 29.03) og flom (høyre: dag 74: 27.04.1993). Pilene indikerer strømretninger. Linjene indikerer grunnvannsnivåene (20 cm ekvidistanse).



Figur 12. Endring i grunnvannstrømningsbilder og strømningsmengder (nederst) ved flom i Otta i slutten av februar 1993 (dag 15, 17 og 19). Pilene indikerer strømretninger. Linjene indikerer grunnvannsnivåene (10 cm ekvidistanse). Strømningsmengder (fluks) er angitt i m/dag (0.01=10 mm/dag). Negative verdier (i blått) indikerer at grunnvann strømmer mot de øverste lagene (utstrømning til elvene), mens de positive verdier (i rødt) viser at elvevann infiltreres i grunnen.



Figur 13. Endring i grunnvannstrømningsbilder og strømningsmengder (nederst) ved vårflom i Otta i 1993 (dag 64, 72 og 92). Pilene indikerer strømretninger. Linjene indikerer grunnvannsnivåene (10 cm ekvidistanse). Strømningsmengder (fluks) er angitt i m/dag (0.01=10 mm/dag). Negative verdier (i blått) indikerer at grunnvann strømmer mot de øverste lagene (utstrømning til elvene), mens de positive verdier (i rødt) viser at elvevann infiltreres i grunnen.

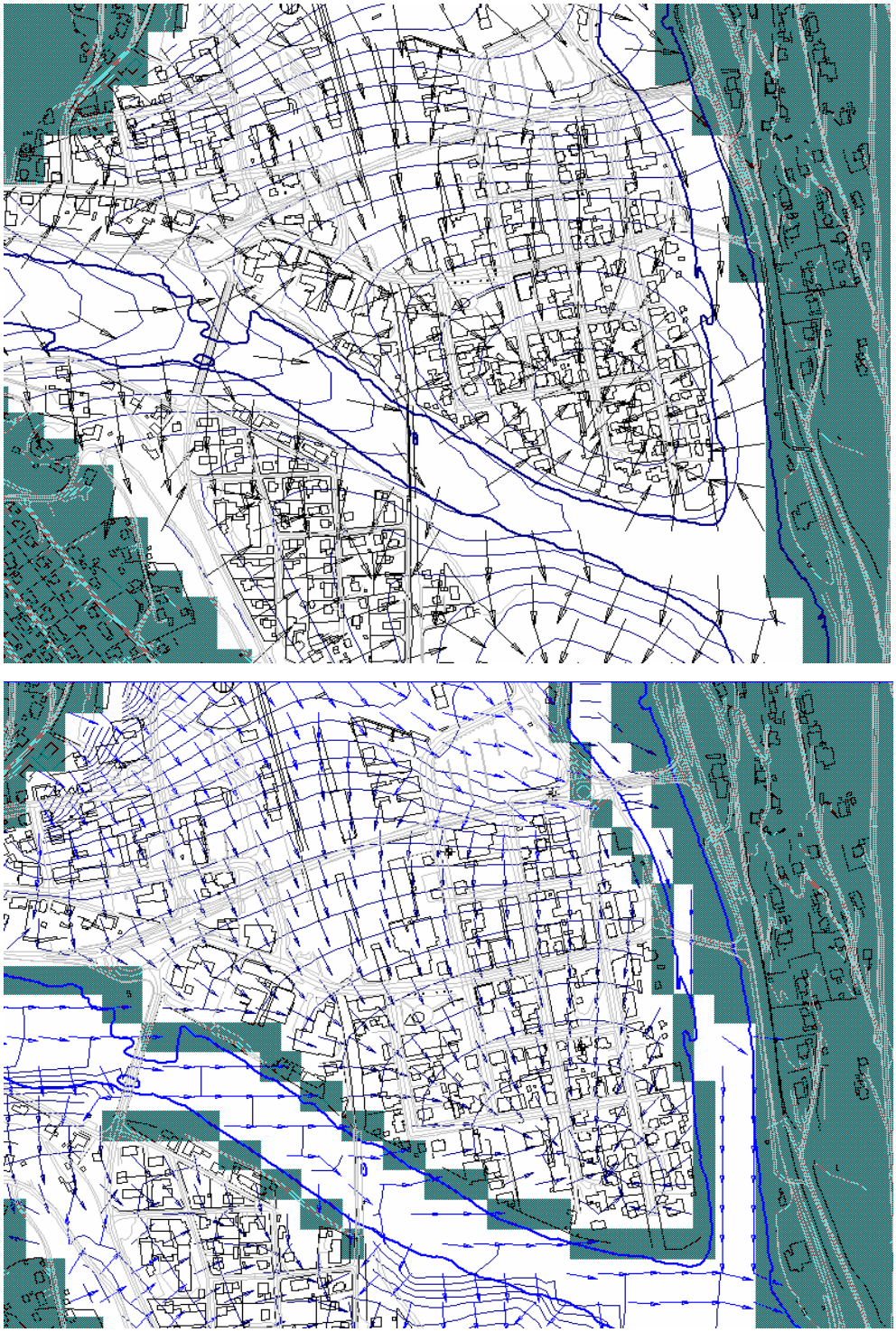
4.2. Effekt av eksisterende og vurderte flomverk

Vestsiden av Lågen fra Otta sentrum og nordover (Øiaområdet) er sikret med to flomverk (Høydal, 2000). Det nederste går fra bruene og opp forbi Kleivrud Nordre (Øien). Et noe lavere flomverk starter her og går forbi campingplassen og industriområdene. Langs Otta er det også to flomverk. Den ene ligger på sørsiden av Otta, området mellom Otta bru og jernbanebrua, og sikrer området Ottbragden. Det andre ligger nord for Otta – vest for Otta bru. Hensikten med flomverk er først og fremst å beskytte lavpunktene mot direkte oversvømmelser, og sikre jordbruksområder og tett befolkede områder.

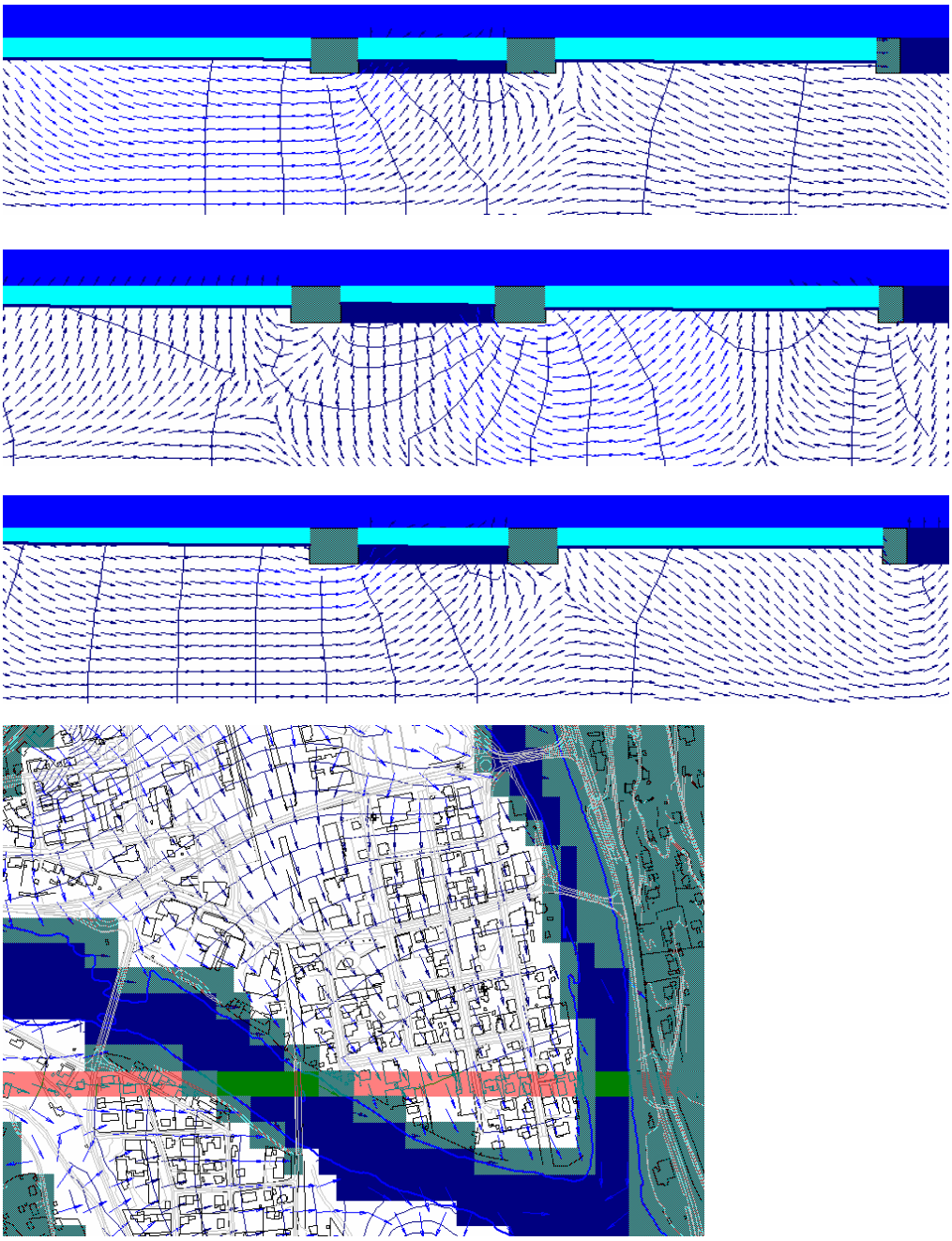
For å simulere effekten av flomverkene på grunnvannsforhold, simulerer vi flomverkene med inaktive celler[3] langs kantene av elvene (vanndyp er antatt å være 6 m i modellen og inaktive celler er 8 m dyp). Forbygningen er antatt å være helt ugjennomtrengelig i modellen, noe som er en sterkt idealisert situasjon. De fleste flomfyllingene langs norske vassdrag konstrueres ved bruk av stedlige masser og med steinplastring på elvekanten. (NVEs vassdragshåndbok).

Som forventet har flomverkene kun lokal effekt på grunnvannsforhold: Strømningsbildet og grunnvannsnivået er ikke endret med de eksisterende flomverkene. Figur 14 viser at byggingen av flomverkene langs Otta og Lågen i Otta sentrum ikke vil ha noe effekt på grunnvannsforholdene. Flomverkene beskytter ikke mot inntrengning av vann i grunnen siden grunnvannsmagasinet har en mektighet over 30 m, og at flomverkene ikke er dypere enn noen få meter (figur 15).

[3] Det er også mulig å bruke betingelser ”Wall” i Modflow for å simulere enda bedre effekten av flomverk. Med denne betingelsen kan man angir bredden og hydraulisk ledningsevnen til flomverkene.



Figur 14. Simulert strømningsbilde med (øverst) og uten (nederst) flomverk (dag 74). Pilene indikerer strømretninger. Linjene indikerer grunnvannsnivåene (10 cm ekvidistanse).



Figur 15. Strømningsbildet i et tverrprofil (se lokalisering i nederste figur): dag 68, 74 (flom) og 85. Flomverkene er simulert med inaktive celler i den øverste delen av grunnvannsmagasinet. Pilene indikerer strømretninger. Linjene indikerer grunnvannsnivåene (10 cm ekvidistanse).

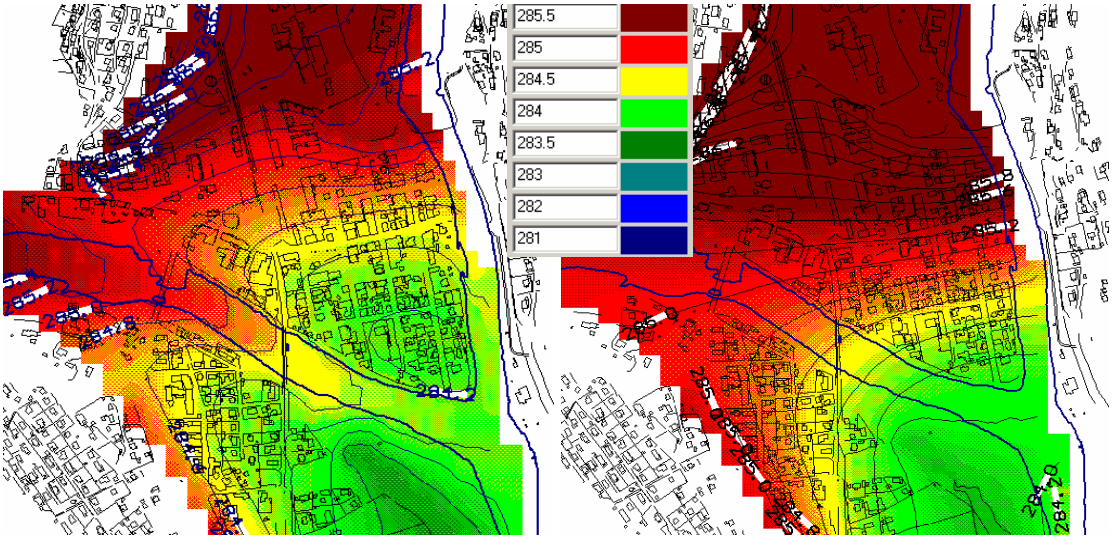
4.3. Effekt av tetning av elvebunnene

For å redusere inntrenging av elvevann i grunnen ved Otta sentrum er det foreslått å tette bunnen til elvene. Vi har simulert dette tiltaket ved å analysere endringer i strømningsbildet og grunnvannsnivået med en hydraulisk ledningsevne i bunnsedimenter som er 1000 ganger lavere enn i den kalibrerte modellen (reduksjon av vanngjennomtrengning i bunnsediment fra 10^{-5} m/s til 10^{-8} m/s).

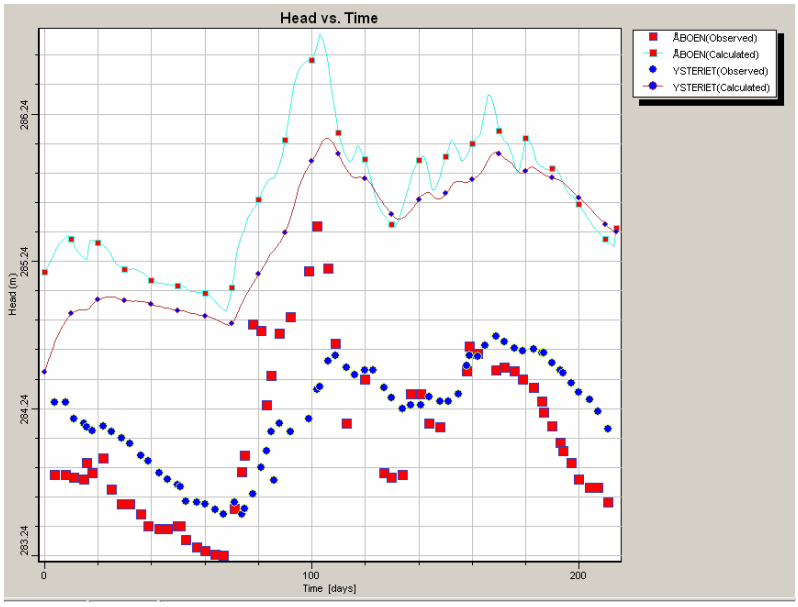
Resultatene fra simuleringer med tettere bunnsedimenter ved Otta sentrum (fra profil 19 til 4 i Otta og 9 til 4 i Lågen) viser at grunnvannsnivået i Otta sentrum vil øke kraftig (figur 16), slik at problemet med oversvømmelser blir større enn før. Tettere bunnsedimenter under elvene fører til mindre endringer i strømbildet ved flom: grunnvannet renner på en mer permanent måte mot samløpet mellom Otta og Lågen, men grunnvannsnivået i Otta sentrum blir hevet med ca. 1.20 m (figur 17).

En fullstendig sikring mot lekkasjer i undergrunnen er ikke økonomisk forsvarlig og teknisk sett vanskelig å oppnå. Risikoen for lekkasjer uansett bra utforming av tetningen vil være stor. I tillegg viser simuleringene at tiltaket vil gi dårligere grunnvannsforholdene med flere oversvømte kjellere selv ved normal vannføring i elvene. Hovedårsaken er at tetningen av bunnsedimenter vil føre til en akkumulering av grunnvann i Otta sentrum fordi grunnvannet hovedsaklig stammer fra nordsiden av elvesletta (infiltrasjon fra Lågen) og fra vestsiden (infiltrasjon fra overliggende felt).

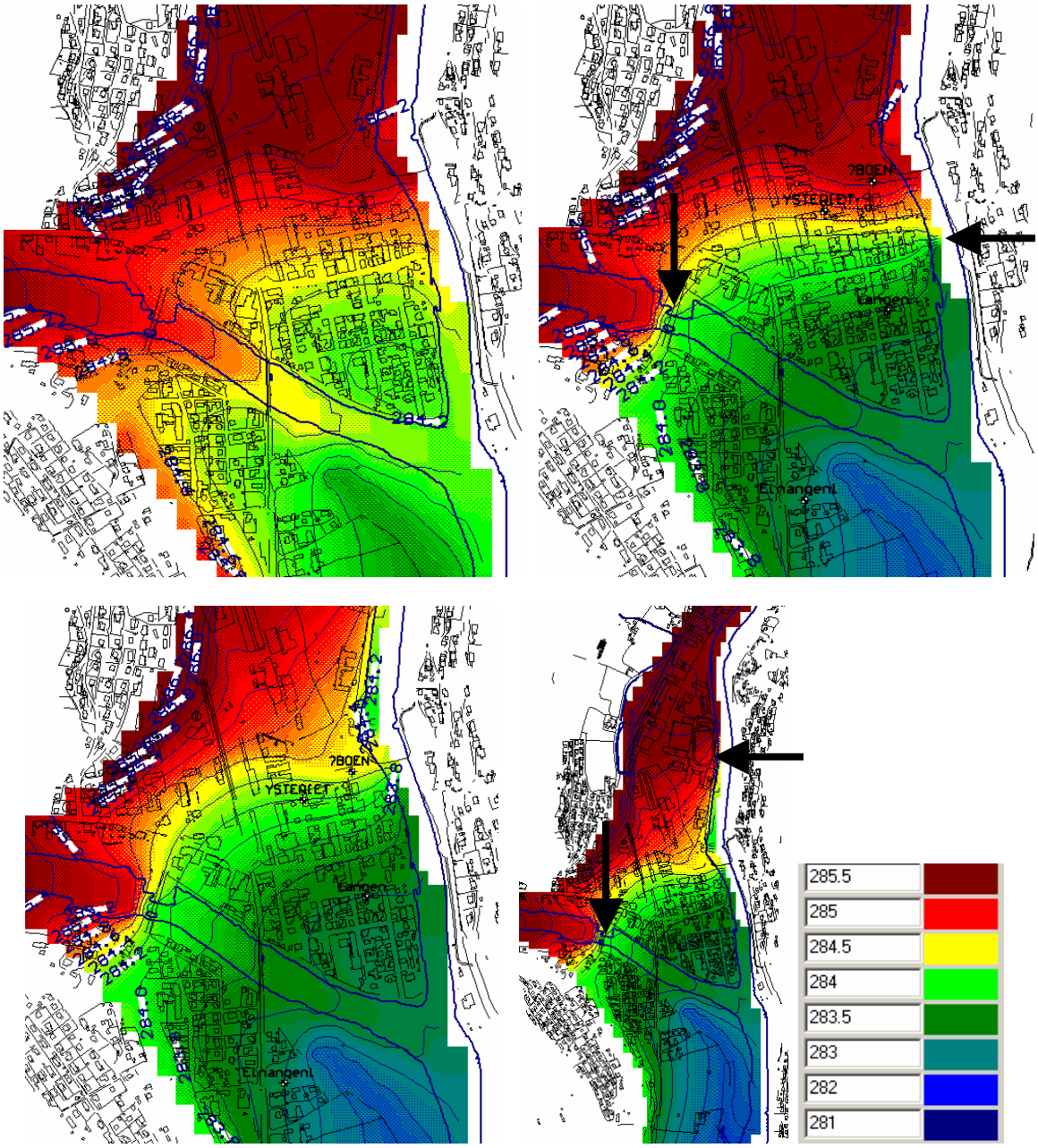
Løsningen kan derfor være å grave ut bunnsedimenter for å øke vanngjennomtrenging mellom grunnvannsmagasinet og elvene. Denne løsningen vil fungere kun hvis bunnsedimentene er tettere enn grunnvannsmagsinets avsetning, noe som ikke er tilfellet i modellen.



Figur 16. Strømningsbildet og grunnvannsnivået (m o.h.) ved vårflom (dag 104 tilsvarende 25.04.1993). Venstre figur: naturlige bunnsedimenter (hydraulisk ledningsevne på 10^{-5} m/s). Høyre figur: tettere bunnsedimenter (hydraulisk ledningsevne på 10^{-8} m/s). Linjene indikerer grunnvannsnivåene (20 cm ekvidistanse).



Figur 17. Observerte grunnvannsnivåer (punkter) ved Otta sentrum, og simulerte grunnvannsnivåer (linjer) med tettere bunnsedimenter.



Figur 18. Strømningsbildet og grunnvannsnivået (m o.h.) ved vårflom (dag 104 tilsvarende 25.04.1993). Venstre øverste figur: observert elvevannstand. Høyre øverste figur: Senket vannstand nedstrøm Otta- og Lågenbruene (se pilene). Nederste figurer: Senket vannstand nedstrøm Otta og stadion (se pilene). Linjene indikerer grunnvannsnivåene (20 cm ekvidistanse).

4.4. Effekt av senkning av elveløp

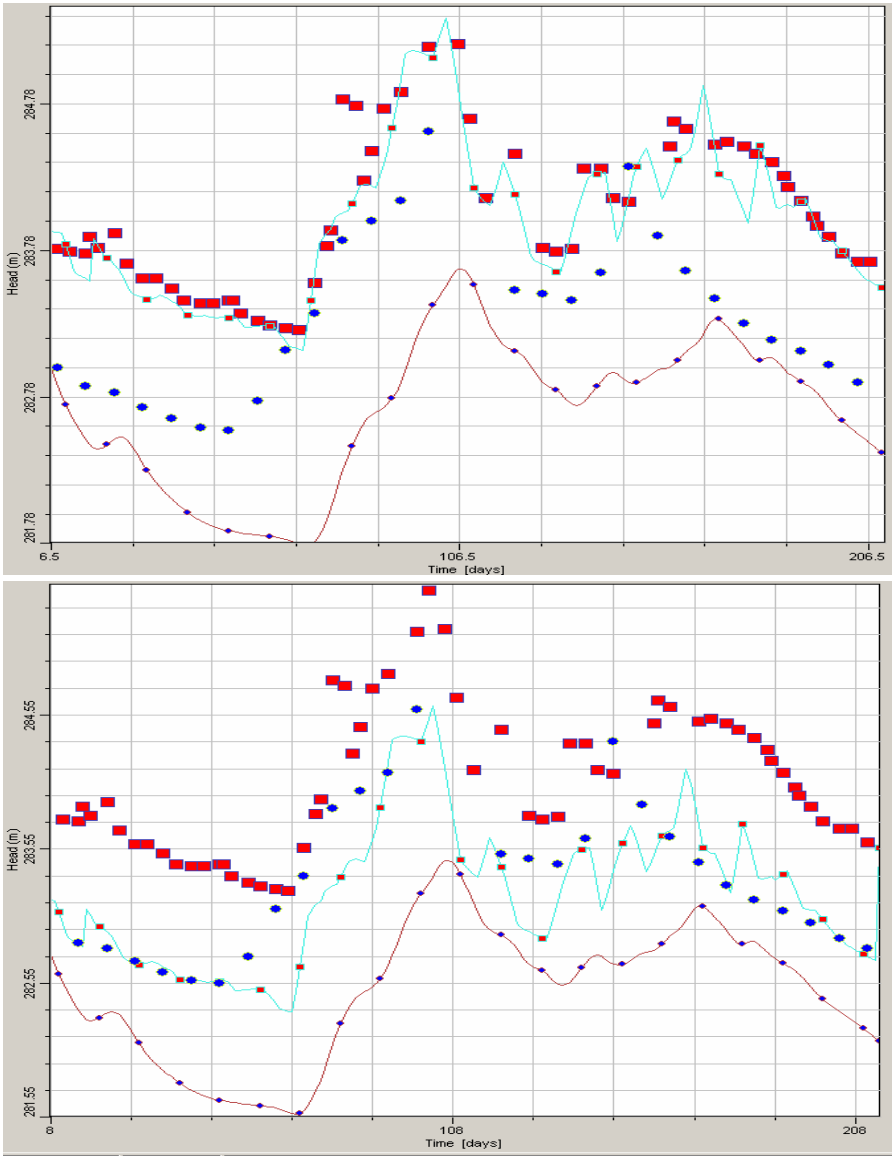
Vi analyserer her virkningen av senkningen av vannivået i elvene. For å senke vannivået må elveløpene graves ut, og vi simulerer derfor både en senkning av vannhøyde (m o.h.) og av elvebunnene (relative vanndyp er ikke endret).

Senkning av flomløpet sør for Otta kan ikke simuleres direkte i denne modellen, fordi dette området ikke er en aktiv betingelse i modellen (”River betingelser”). Senkningen implementeres i modellen fra profil 18 (Ottabru) og profil 6 (Lågenbru) og helt nede i modellen til profil 1[4] (sør for Bolongen). I virkeligheten vil dette medføre bygging av en terskel på 1 m høyde ved begge bruene. Vi har også analysert effekten av en utvidet senkning i Lågen, opp til profil 9 (ved stadion).

Resultatene fra simuleringene (figur 18 og 19) viser at senkningen av elveløpene (fra begge bruene) vil forårsake en begrenset senkning (noen få cm) av grunnvannsnivået nord for Otta sentrum (P-plass, observasjonsbrønn Åboen). Dette tiltaket vil imidlertid ha en veldig positiv effekt i Otta sentrum hvor grunnvannsnivået vil ligge ca. 0.8-1.0 m under nåværende nivå (observasjonsbrønn Tangen).

Utvidet senkning i Lågen opp til profil 9 har betydelig større virkningen på grunnvannsnivået i området nord for Otta sentrum: senkningen ved observasjonsbrønn Åboen er på ca. 80-100 cm ved flom og 60-80 cm ved normal vannføring.

[4] Vannstandene ved profil 1 er ikke endret, men modellen beregner en linear relasjon mellom vannstand i profil 4 (samløp Otta-Lågen) og profil 1 (sør for Bolongen).



Figur 19. Observerte grunnvannsnivåer i 2 observasjonsbrønner (Tangen: blå punkter; Åboen: røde firkanter) i simuleringsperioden, og simulerte nivåer ved en senkning av elveløpene med 1 m nedstrøm Otta og Lågen bruene (øverste figur), og ved en utvidet senkning av elveløpene opp til profil 9 ved stadion (nederst).

4.5. Effekt av lokal utpumping av grunnvann

Ved utsatte områder for oversvømmelser er det mulig å iverksette enkelte tiltak for å senke grunnvannsnivået lokalt. Et enkelt tiltak består i å holde grunnvannet på en bestemt maksimum høyde ved å pumpe ut grunnvann ved hjelp av en eller flere brønner og vannpumper. Siden det her gjelder her først og fremst å holde grunnvannsnivået under en viss grense over et relativt stor areal (P-plassen) kan det med fordel opprettes et dreneringssystem som er koblet til et system av pumper.

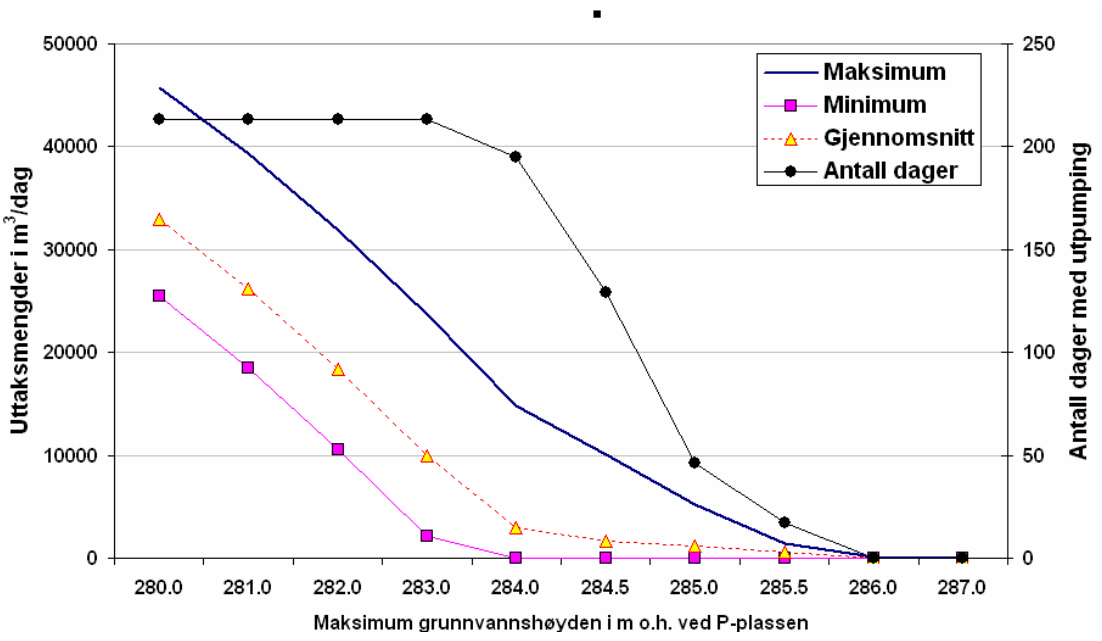
For å vurdere hvor gjennomførbart dette tiltaket er, skal vi estimere hvor mye vann som må pumpes ut for å holde det aktuelle området fritt for oversvømmelse. Dette gjøres ved å implementere en spesiell betingelse i modellen (”constant head” på ulike vannhøyder angitt i m o.h.), og estimere vannmengder som må tas ut vha. av en såkalt ”budsjettsone”.

Tabell 11 og figur 20 viser mengde vann i m^3/dag som må pumpes ut for å holde grunnvannsnivået under bestemte vannhøyder angitt i m. o.h. ved det aktuelle området (P-plassen). Resultatene fra simuleringene viser at tiltaket vil kreve en maksimum uttaksmengde på 5200 m^3/dag (tilsvarende 60 l/s) ved 1993s vårflom[5] for å holde grunnvannsnivået under 285 m. o.h., og 14763 m^3/dag (tilsvarende 171 l/s) for å holde grunnvannsnivået under 284 m. o.h.

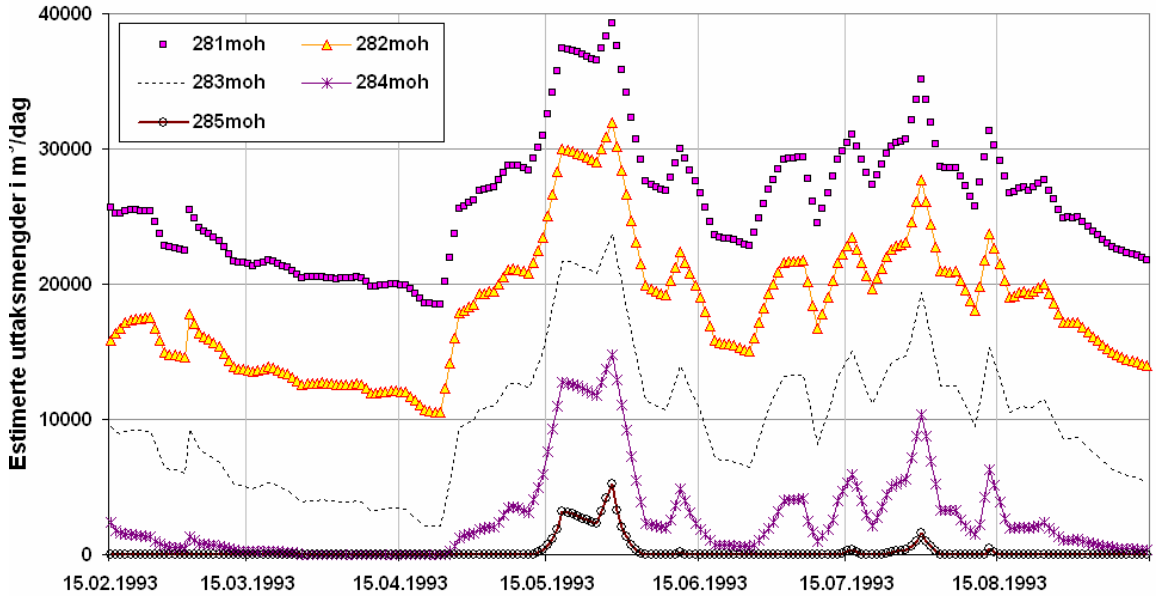
Vannhøyde m o.h.	Maksimum uttak m^3/dag	Minimum uttak m^3/dag	Gjennomsnitt uttak m^3/dag	Total uttak i 213 dager m^3	Antall dager med uttak
280.0	45755	25436	32954	7019100	213
281.0	39304	18462	26162	5572423	213
282.0	31910	10544	18414	3922256	213
283.0	23695	2138	9923	2113554	213
284.0	14763	10	2941	573432	195
284.5	10055	17	1676	216266	129
285.0	5200	4	1183	54403	46
285.5	1475	14	635	10791	17
286.0	165	0	1	165	1
287.0	0	0	0	0	0

Tabell 11. Estimerte uttaksmengder pr. dag for å holde grunnvannsnivået under bestemte vannhøyder ved P-plassen i simuleringsperioden 15.02-15.09.1993.

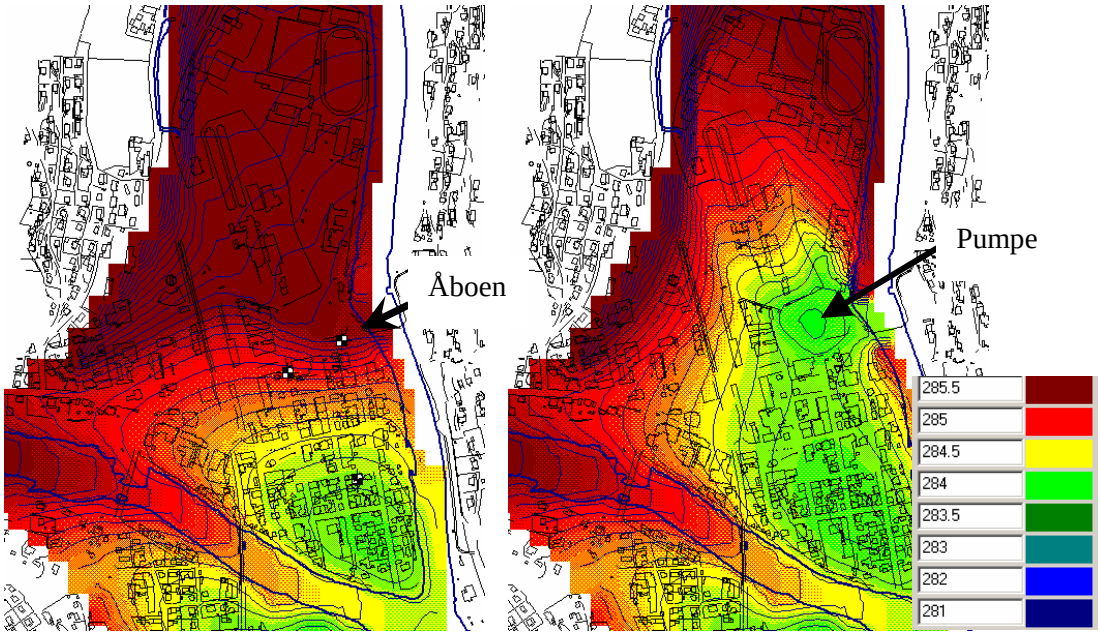
[5] Vannstand ved Otta bru var i april 1993 litt over 285 m o.h., og i Lågen 284.7 ved Lågen bru.



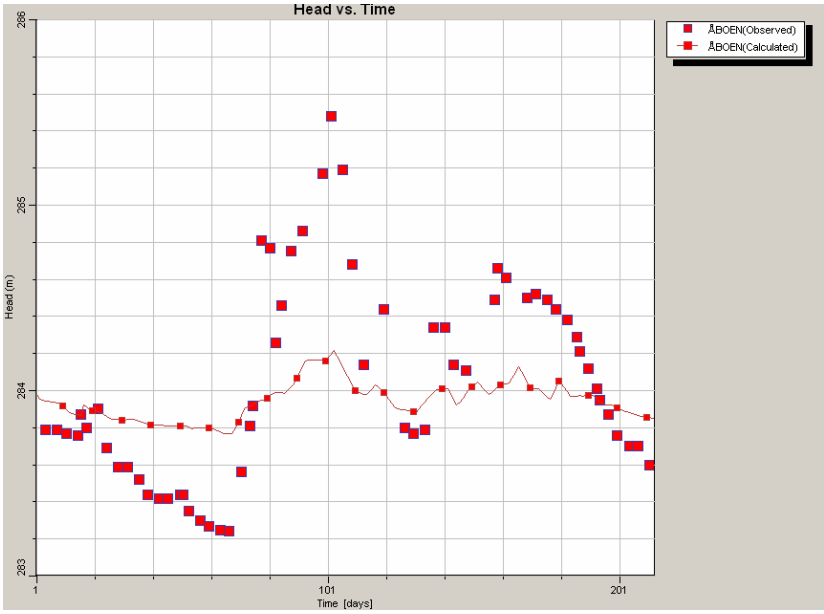
Figur 20. Estimerte uttaksmengder i m^3/dag for å holde grunnvannsnivået under bestemte vannhøyder ved P-plassen i simuleringsperioden 15.02-15.09.1993.



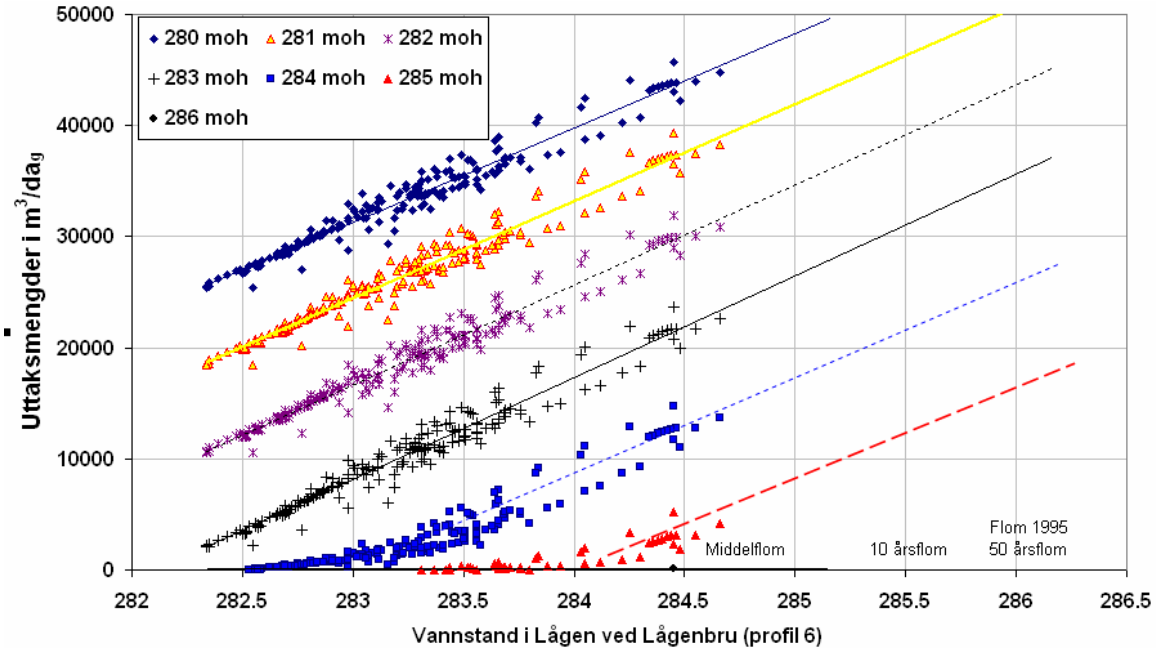
Figur 21. Estimerte uttaksmengder i m^3/dag for å holde grunnvannsnivået under bestemte vannhøyder ved P-plassen i simuleringsperioden 15.02-15.09.1993.



Figur 22: Strømningsbildet og grunnvannsnivået (m o.h.) ved vårflom (dag 104 tilsvarende 25.04.1993). Venstre figur: uten pumping; høyre: med pumping for å holde grunnvannsnivået under 284 m o.h. Linjene indikerer grunnvannsnivåene (10 cm ekvidistanse).



Figur 23. Observerte grunnvannsnivåer i observasjonsbrønnen Åboen i simuleringsperioden 15.02-15.09.1999, og simulerte nivåer ved et tiltak (drenering/pumping) som holder grunnvannsnivået under 284 m.o.h.



Figur 24. Nødvendige uttaksmengder av grunnvann ved P-plass for å holde grunnvannsnivået under et bestemt nivå (m o.h.) som en funksjon av vannstand i Lågen.

Figur 24 viser at relasjonen mellom nødvendige uttaksmengder for å holde grunnvannsnivået på en viss høyde ved P-plassen er en linear funksjon av vannstand i Lågen. Vha. denne figuren kan man derfor estimere uttaksmengder ved større flommer enn i 1993. Vedlegg 3 viser at middelflom på Lågen ligger på 284.83 m o.h, mens flommen i 1995 var på ca. 286.07 m o.h..

Resultatene viser at det blir praktisk sett vanskelig å holde P-plassen fri for vann ved en stor flom, selv med bygging av flomverkene i Otta sentrum.

Det hefter en viss usikkerhet ved disse resultatene. Tettere materialer enn hva vi har simulert ved det aktuelle området vil f. eks. føre til behov for mindre uttaksmengder for å holde grunnvannsnivået på et visst nivå. Høyere hydraulisk ledningsevne i det aktuelle området og større lekkasjer fra Lågen vil sannsynligvis føre til at tiltaket vil fungere dårlig. Det anbefales derfor først å teste effekten av utpumping av grunnvann på grunnvannsnivået på det aktuelle området før det planlegges et omfattende dreneringssystem. Et alternativ kan være f. eks. å bygge opp hele parkeringsplassen ca. 1 meter.

5. Konklusjon

Med dette arbeidet har vi dokumentert hvordan grunnvannsforholdene vil endre seg som følge av iverksettelse av ulike type tiltak som flomverk, tetning av elvebunnene, senkning av elveløp og lokal drenering og utpumping av grunnvann.

Grunnvannsmodellen er bygd opp med bakgrunn i de tilgjengelige dataene for geometri, geologi og hydrologi. Modellen er kalibrert og kjørt for en periode fra 15.02 til 15.09.1993. Perioden som ble valgt representerer et år med litt høyere vårflom enn et normalt år. Simuleringer kjøres med døgndata (213 dager) ved bruk av interpolerte manuelle observasjoner for vannstand i Otta og Lågen. Modellen er kalibrert mot ca. 330 observasjoner av grunnvannsstand. Det er lagt vekt på å kalibrere modellen mot observasjoner utført i Otta sentrum, slik at modellen er mer usikkert for området sør og nord for Otta sentrum.

Resultatene fra simuleringer viser at:

- Grunnvannsnivået i Otta sentrum er styrt av elvevannstand i Otta og Lågen. Strømningsbildet endrer seg ved raske fluktuasjoner i elvevannstand slik at elvevann infiltreres i grunnen mot Otta sentrum fra alle kanter ved flom.
- Flomverkene har begrenset effekt på grunnvannsforholdene siden mektigheten til grunnvannsmagasinet er på ca. 30 m. Strømningsbildet og grunnvannsnivået er ikke endret med de eksisterende flomverkene. Byggingen av flomverkene langs Otta og Lågen i Otta sentrum vil heller ikke forbedre grunnvannsforholdene.
- Tetning av elvenes bunnsedimenter ved Otta sentrum vil føre til en økning av grunnvannsnivået, slik at problemene med oversvømmelser blir verre enn før. Grunnvannsnivået i Otta sentrum blir f. eks. hevet med ca. 1.20 m ved å redusere den hydrauliske ledningsevnen fra 10^{-5} til 10^{-8} m/s.
- Senkningen av elveløpene (fra begge bruene og nedstrøm) vil forårsake en begrenset senkning (noen få cm) av grunnvannsnivåer nord for Otta sentrum. Et utvidet senkning i Lågen opp til profil 9 (stadion) vil ha betydelig større positive virkninger på grunnvannsnivåer i området nord for Otta sentrum.
- Lokal utpumping og drenering av grunnvannet vil kunne sikre at grunnvannet holdes på en bestemt maksimum høyde. Dette forutsetter imidlertid relativt høye uttaksmengder: tiltaket vil f. eks. kreve en maksimum uttaksmengde på 5200 m^3/dag (tilsvarende 60 l/s) ved 1993s vårflom for å holde grunnvannsnivået under 285 m. o.h. Vi har også estimert nødvendige uttaksmengder ved ulike vannhøyder i Lågen.

Elvevannstanden styrer vannivået i grunnvannsmagasinet, og egenskapene til bunnsedimentene kontrollerer utvekslingsmengdene mellom grunnvannsmagasinet og overflatevann. Alle tiltak som medfører senkning av elvevannstandene og øker vanngjennomgangen i bunnsedimenter, vil føre til lavere grunnvannsnivå i Otta sentrum.

Hovedkonklusjonen er at dyre tiltak som forsterkning av eksisterende flomverk og tetning av bunnsedimenter ikke vil forbedre situasjonen og motsatt kan føre til dårligere grunnvannsforhold i Otta sentrum.

Å kvantifisere usikkerhet i hydrogeologiske analyser er svært vanskelig. Kvaliteten til modellen avhenger først og fremst av kvaliteten på dataene som er brukt for å bygge modellen. Usikkerheten med simulerte grunnvannsnivåer anslås å være rundt +/- 0.8 m.

Mindre usikkerhet i resultater fra modellen kan oppnås ved å forbedre kvaliteten til grunnlagsdata. Prøver av bunnsedimenter og av materialer ved det utsatte området, og etterfølgende kornfordelingsanalyse, vil kunne gi verdifull informasjon om grunnens hydraulisk ledningsevne. Hyppigere måling av grunnvannstand og vannstand i Otta og Lågen på timebasis, samt nøyaktige nivelleringen av vannmerkene, observasjonsbrønner og gradienten i elvene, ville også gi et bedre grunnlag for kalibrering av modellen.

Referanser

Beldring S., Roald L. og Voksø A., 2002. Avrenningskart for Norge. Årsmiddelverdier for avrenning 1961-1990. NVEs Dokument 2-2002.

Colleuille og Pedersen, 1998. Grunnvannsundersøkelser på Otta. Forenkling av grunnvannsmålinger. NVEs rapport 14-1998.

Colleuille H., Pedersen T.S., og Dimakis P., 2004a. 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., 2004b. 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.

Colleuille H., Wong W., Dimakis P, 2004c. Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma i Rena, Hedmark (002.Z). Rapport 3. Grunnvannsmodellering. NVEs rapport Miljøbasert vannføring 3-2004.

Drageset T.A., 2000. Flomsonekart. Flomberegning for Otta og Gudbrandsdalslågen. NVEs Dokument 4-2000.

Høydal Ø.A., 2000. Flomsonekart. Delprosjekt Otta. NVEs rapport 5-2000.

Pedersen T.S., 1996. Grunnvannsobservasjoner fra Otta, NVEs rapport 38-1996.

Renshusløkken B., 1968. Grunnvannsundersøkelser på Otta. NVEs rapport 7/68.

Wong W.K., Pedersen T.S., og Kitterød N.O., 1996. Grunnvannsmodellering, Otta. NVEs publikasjon Nr 21-1996.

Vedlegg 1

Prinsipp for å fastsette fluksen i cellene for hver sone. Det antas en ”effektiv nedbør” på 200 mm/år. Metoden er beskrevet i Colleuille et al. 2004c.

Tilsigsområde til	Areal m^2	Antall celler 58.5×40.6 m	Totalt areal av cellene i m^2	Forhold mellom areal til tilsigsområde og cellene	Tilsig angitt i mm/år for hver celle
Otta sentrum	$2.5\ 10^6\ m^2$	22	52252	48	200*48 = 9600
Elvesletten sør for Otta (Bolongen)	$1.5\ 10^6\ m^2$	22	52252	29	200*29 = 5800

Vedlegg 2

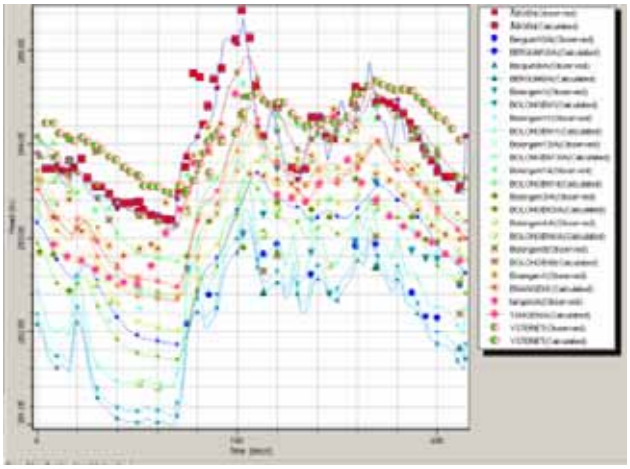
Beregnet vannstand ved middelflom og 1995-flom ved ulike tverrprofiler (etter Høydal, 2000).

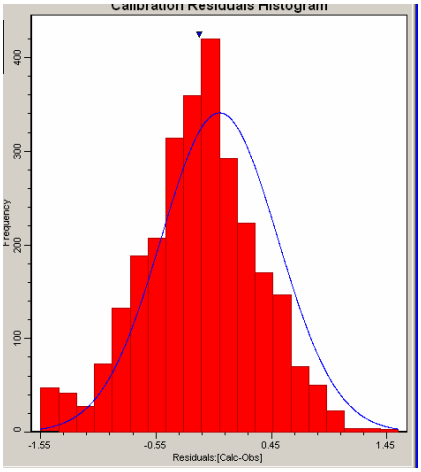
	Beregnet vannstand ved middelflom	**Beregnet vannstand flom 1995**	**Gradient ved middelflom**
Otta profil 19	285.87	285.71	
Otta profil 18 (Otta bru)	285.29	285.48	-0.58
Otta profil 17	285.22	285.43	-0.07
Otta profil 16	284.87	285.34	-0.35
Otta profil 15	284.79	285.3	-0.08
Lågen 4	284.36	284.99	-0.43

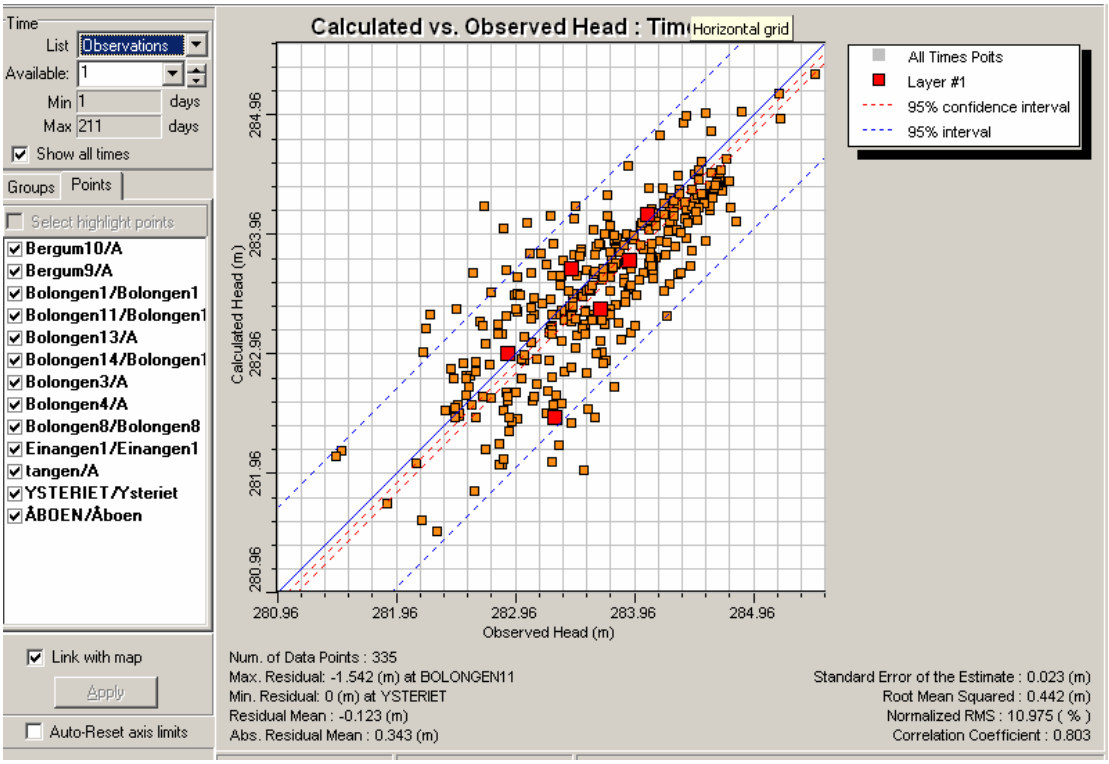
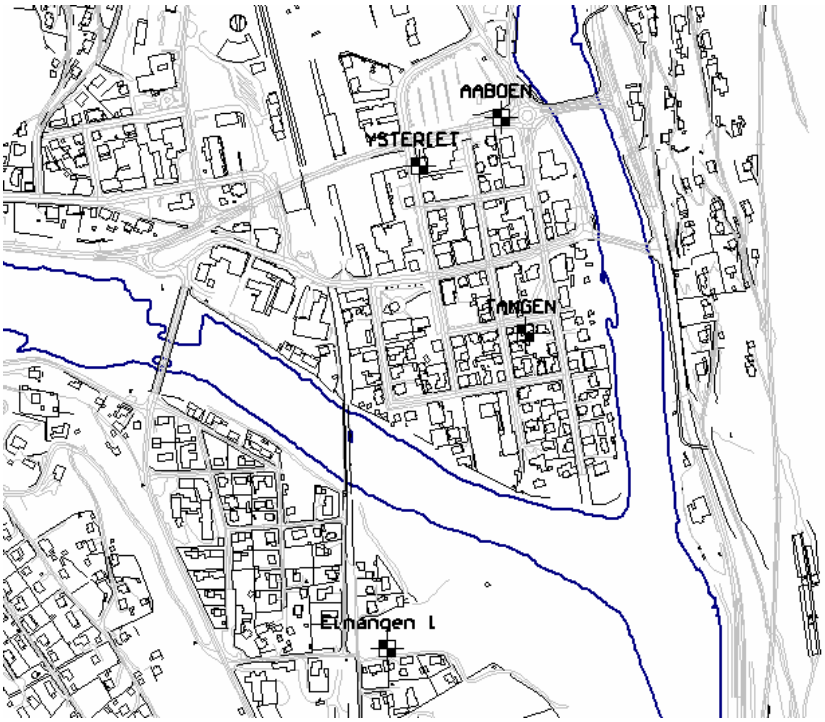
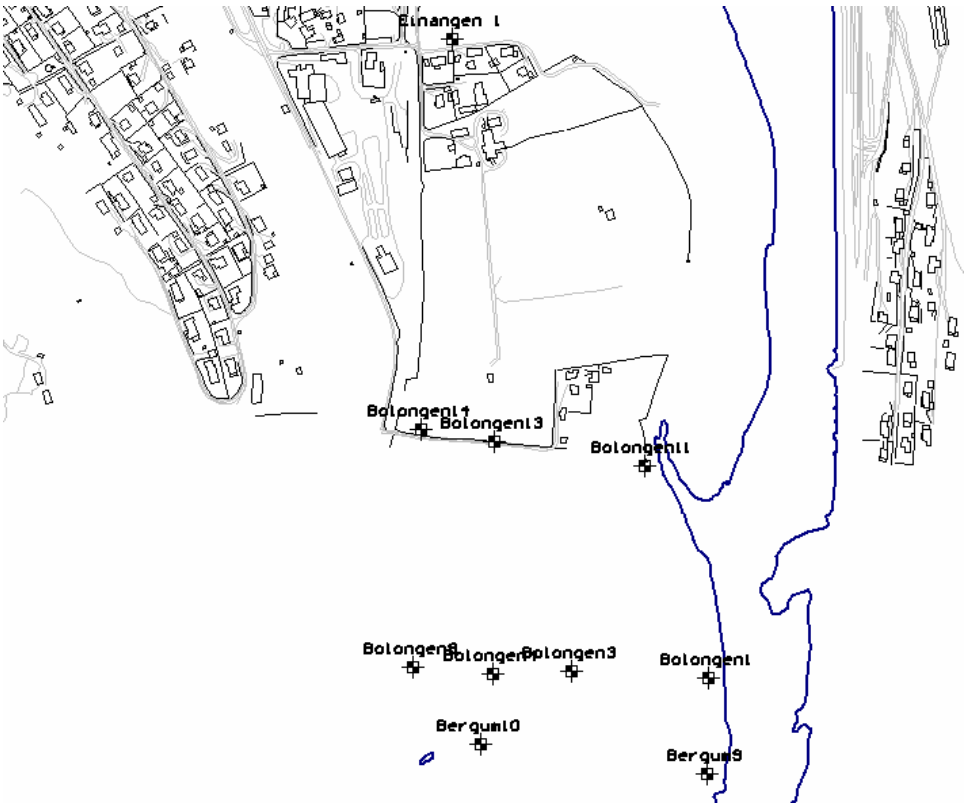
Lågen 12	**289.30**	**290.85**	
Lågen 11	288.03	289.5	-1.27
Lågen 10	287.08	288.52	-0.95
Lågen 9	286.13	287.42	-0.95
Lågen 8	285.30	286.65	-0.83
Lågen 7	285.09	286.46	-0.21
Lågen 6 (Lågen bru)	284.83	286.07	-0.26
Lågen 5	284.47	285.45	-0.36
Lågen 4	284.36	284.99	-0.11
Lågen 3	284.15	284.5	-0.21
Lågen 2	283.64	283.69	-0.51
Lågen 1	282.97	283.47	-0.67

Vedlegg 3

Resultater fra modellkalibrering med alle observasjonsbrønner (se lokalisering neste siden)







Kart over Otta som viser observasjonsbrønnene brukt for kalibreringen av modellen.