

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



## **Forord**

Grunnen til at jeg valgte å gjøre denne oppgaven, er at jeg synes temaet er veldig spennende. Er det mulig å modellere transport av forurensning i grunnvann, uten å gjøre et stort feltarbeid på forhånd? Jeg har bakgrunn som IT-programmerer, og denne oppgaven virket som en mulighet til å bruke mine datakunnskaper, i tillegg til å tilegne meg mer kunnskap innenfor veldig spennende områder: Hydrologi og hydrogeologi.

Arbeidet med oppgaven har vært lærerikt. Mye tid har gått med til å lage modellen i COMSOL. Dette verktøyet var ukjent for meg, og det har en ganske høy brukerterskel. I tillegg var det en del arbeid i GIS og MATLAB for å få gjort data klart, til å bli importert til COMSOL. Det som er veldig gledelig, er at jeg føler jeg har lært mye hydrologi, i tillegg til kunnskapen jeg har tilegnet meg i COMSOL, MATLAB og GIS.

En stor takk rekkes til hovedveileder Nils Otto Kitterød fra UMB. Vi har hatt mange lange og gode samtaler. Det har vært til veldig stor hjelp. Nils Otto er alltid positiv og har mye kunnskap og entusiasme for faget. En stor takk også til Kjersti Kronvall Wike fra Statens Vegvesen som har vært biveileder. Kjersti har gitt gode råd i skrivefasen, noe som har vært veldig viktig i innspurten av oppgaven.

I tillegg vil jeg takke min kone Trine for støtte og inspirasjon. Hun har et smittende humør og er flink til å sette fokus på de viktige tingene.

## Sammendrag

Flere av Norges grunnvannsakviferer får tilført veisalt fra veier i nærområdet, slik at det kommer klorid og natrium i brønnen. Hensikten med masteroppgaven var å lage en metode for å modellere transport av klorid i grunnvannsakviferer. En slik metodikk vil være til stor hjelp for å optimalisere veisalting, slik at tålegrenser for miljøet ikke overskrides. Oppgaven har som hypotese at vannbalansen er det viktigste elementet når det gjelder transport av klorid i grunnen.

Verktøyet som brukes til numerisk modellering er COMSOL. I tillegg brukes GIS og MATLAB for å gjøre klar inndata til modellen.

Modelleringen vektlegger vannbalansen i stor grad. Dette betyr at det er stort fokus på vannmengdene som kommer inn i modellen. Både ved infiltrasjon fra avrenning og infiltrasjon fra elv. Strømmen av grunnvann modelleres stasjonært, mens transporten av kloridet modelleres over et tidsrom på 30 år. Modellen er todimensjonal.

Inndataene til modellen kommer fra nasjonale hydrologiske og geologiske databaser. Type inndata er avrenning, topografi, tykkelse på løsmasser, saltmengder fra vei, bakgrunnsverdier for salt i grunnvann og total pumperate for grunnvannsbrønnene.

Et problem som ofte oppstår i numeriske modeller er numerisk dispersjon. Det var også tilfellet i modellen i denne oppgaven. Numerisk dispersjon ble eliminert ved å regne ut kloridkonsentrasjonen med en alternativ metode, i tillegg til COMSOL sin løsning av transportligningen. Denne alternative metoden regner ut kloridkonsentrasjonen i brønnen, ut fra forholdet mellom brønnens totale pumperate og saltmengden fra veien i brønnens nedslagsfelt.

Sammenligning av simulerte og observerte kloridkonsentrasjoner i brønnen ved Bø vannverk, tyder på at metoden er ganske god. Differansen mellom simulerte og observerte kloridverdier er liten. Det ser også ut som mengden vann i modellen har størst innvirkning på kloridkonsentrasjonen i brønnen. Mye vann i modellen fører til lavere konsentrasjon av klorid i brønnen på grunn av fortykning. Dermed er minimering av usikkerheten rundt vannmengden som infiltrerer modellen veldig viktig.

## Summary

Several of Norway's groundwater aquifers receive roadsalt from roads nearby, leading to chloride and sodium in the water in the wells. The purpose of the master thesis was to construct a method for numeric modeling of transport of chloride, in groundwater aquifers. Such a method will be valuable in optimizing appliance of road salt, so that critical loads for the environment are not exceeded. The thesis has as a hypothesis that the waterbalance is the most important element when it comes to transport of chloride in an aquifer.

COMSOL is used for numeric modeling. In addition, GIS and MATLAB are used for processing data, before COMSOL can import them.

The model emphasizes the waterbalance. This means that there is focus on the amounts of water that infiltrates the model. The water comes from runoff and from river infiltration. The groundwater flow is modeled in a stationary study, while the transport of chloride is modeled in a time dependant study, over a period of 30 years. The model is two dimensional.

The models indata come from national hydrological and geological databases. Types of indata are runoff, topography, thickness of sediments, amounts of salt applied to road, background levels of salt in groundwater and the total pumping rates of the wells.

Numeric dispersion is often a problem in numeric models. This was also the case in the model in this master thesis. The numeric dispersion was however eliminated by calculating the chloride concentration with an alternative method, in additions to COMSOL's solution of the transport equation. This alternative method calculates the chloride concentration from the relationship between the wells total pumping rate and the total salt amount from the road in the wells catchment.

Comparing the simulated and observed chloride concentration in the wells water imply that the method is good. The differences between the simulated and observed chloride concentrations are small. It also seems that the amount of water, in the model, has the largest impact on the wells chloride concentration. Large amounts of water lead to smaller concentrations of chloride in the well because of dilution. This means, the uncertainty in the water amount infiltrating the model should be minimized as much as possible.

## Innhold

1	INNLEDNING .....	10
1.1	Bakgrunn .....	10
1.2	Formålet med oppgaven .....	13
1.3	Valg av område .....	13
1.4	Tidligere studier .....	14
2	TEORI .....	15
2.1	Darcy's lov .....	15
2.2	Massebalanselikningen .....	16
2.2.1	Laplace likningen .....	16
2.2.2	Poisson likningen .....	17
2.3	Dupuit-Forchheimer strømning .....	18
2.4	Transport og spredning .....	18
2.4.1	Adveksjon .....	19
2.4.2	Diffusjon .....	19
2.4.3	Dispersjon .....	20
2.4.4	Sorpsjon .....	21
2.4.5	Transportlikningen .....	22
3	MATERIALE OG METODE .....	23
3.1	Valg av modelleringsverktøy .....	23
3.2	Vannkjemi .....	23
3.3	Beskrivelse av brønner .....	24
3.4	Områdebeskrivelse .....	25
3.5	Kloridkilder .....	27
3.6	Beskrivelse av inndata .....	28
3.6.1	Avrenning i nedbørsfeltet .....	28
3.6.2	Topografi .....	30
3.6.3	Løsmasser .....	31
3.6.4	Salt på vei .....	33
3.6.5	Bakgrunnsverdier salt i grunnvann .....	34
3.7	Modellen .....	34
3.7.1	Innledning .....	34

3.7.2	Arbeidsprosessen med modellen .....	35
3.7.3	Grid .....	35
3.7.4	Darcy' lov .....	36
3.7.5	Grensebetingelser .....	36
3.7.6	Bøelva .....	37
3.7.7	Avrenning og infiltrasjon .....	37
3.7.8	Brønn .....	37
3.7.9	Parametre .....	38
3.7.10	Transportlikningen .....	38
3.7.11	Usikkerhet.....	38
3.8	Massebalansemetoden .....	39
3.8.1	Innledning.....	39
3.8.2	Fremgangsmåte utregning klorid konsentrasjon ved massebalanse metoden .....	39
3.8.3	Eksempel utregning.....	40
3.9	Numerisk dispersjon.....	40
3.9.1	Test numerisk dispersjon.....	41
3.9.2	Resultat av test numerisk dispersjon .....	42
3.9.3	Omfang numerisk dispersjon .....	42
3.9.4	Konklusjon numerisk dispersjon.....	43
4	RESULTAT.....	44
4.1	Vannmengde til brønn fra Bøelva .....	44
4.2	Kloridkonsentrasjon i brønn ved forskjellige infiltrasjonsscenarioer .....	44
4.3	Dispersjonens påvirkning på kloridkonsentrasjon i brønn .....	45
5	DISKUSJON.....	46
5.1	Valg modell .....	46
5.2	Nedbørsfelt.....	46
5.3	Avrenning .....	47
5.4	Vannbalansen i modellen .....	48
5.5	Brønnens nedslagsfelt .....	48
5.6	Vannføring i Bøelva .....	49
5.7	Bøelva i modellen .....	50
5.8	Infiltrasjon av avrenning til grunnen .....	50
5.9	Topografi .....	51
5.10	Løsmasser .....	51

5.11	Hydraulisk ledningsevne/Transmissivitet.....	52
5.12	Hastighetsfeltet .....	54
5.13	Transport av veisalt med stasjonære strømningshastigheter.....	54
5.14	Veisalt i modellen .....	55
5.15	Bakgrunnsverdier i grunnvann .....	56
5.16	Bakgrunnsverdier Bøelva.....	56
5.17	Porøsitet .....	56
5.18	Dispersivitet.....	56
5.19	Numerisk dispersjon.....	57
5.20	Sensitivetsanalyse .....	58
5.21	Avvik mellom observert og simulert kloridnivå i brønnvannet.....	58
5.22	Alternativ modellering av elv i COMSOL .....	59
5.22.1	Innledning.....	59
5.22.2	Metode elvelement.....	59
5.22.3	Konklusjon elvelement .....	61
6	KONKLUSJON .....	63
7	LITTERATURLISTE.....	64

Vedlegg A: Detaljbeskrivelse av modellarbeidet i COMSOL

Vedlegg B: Beskrivelse av arbeid i Arcmap10

Vedlegg C: Script i MATLAB

## LISTE FIGURER

<i>Figur 1-1 Mengder veisalt påført veiene til Statens Vegvesen de siste årene (Sivertsen 2010)</i> .....	10
<i>Figur 1-2 Spredningsprosesser for veisalt fra veien til omgivelsene (Blomqvist 2001)</i> .....	11
<i>Figur 2-1 Viser vann som infiltrerer gjennom et sandfilter (Cadran&amp;Salva 2011)</i> . ....	15
<i>Figur 2-2 Viser en akvifer der horisontal grunnvannshastighet &gt;&gt; vertikal grunnvannshastighet. N er nedbør (Kilde: Haitjema 1995)</i> .....	18
<i>Figur 2-3 Longitudinal dispersjon. Dispersjonen oppstår som et resultat av forskjeller i transportvei på grunn av at vannet velger forskjellige veier rundt sedimentkornene (Appelo &amp; Postma 1993)</i> . ....	20
<i>Figur 2-4 Transversal dispersjon. Dispersjonen oppstår på tvers av strømlinjene på grunn av diffusjon mellom strømningslinjer (Appelo &amp; Postma 1993)</i> .....	21
<i>Figur 2-5 Viser typiske former for isotermer (Giles et al. 1960). X-aksen viser mengden av stoffet i fast fase, Y-aksen viser mengden av stoffet i væskefasen</i> . ....	22
<i>Figur 3-1 Den svarte pilen peker på de tre brønnene i gult som Bø vannverk består av. I denne oppgave blir disse brønnene modellert som en brønn. Kilde: NGU</i> .....	25
<i>Figur 3-2 Løsmassekart der pilen peker på området hvor Bø vannverk ligger. De orange og gule feltene er henholdsvis glasifluviale og fluviale avsetninger som kan egne seg for løsmassebrønner. Kilde: NGU</i> ..	26
<i>Figur 3-3 Berggrunnskart over området. Kilde: NGU</i> .....	27
<i>Figur 3-4 Viser fordelingen av avrenning i mm/år i nedbørsfeltet som er modellert</i> .....	29
<i>Figur 3-5 Viser hvor mye vann som infiltrerer grunnen i modellen ved <math>\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15</math> og <math>\alpha_{\text{løsmasser}} = 1</math>. Brønnområdet er markert med sort sirkel</i> .....	30
<i>Figur 3-6 Viser topografien i 3D. Varierer fra 1264.6 m til 97.9 m. Elva går i det mørkeblå område som strekker seg over modellen</i> . ....	31
<i>Figur 3-7 Viser berggrunnstopografien. Den er veldig lik topografien i figur 3-6, men har lavere minimumsverdi på 74,7 m. Differansen skyldes mektigheten til løsmasser</i> . ....	32
<i>Figur 3-8 Viser løsmasser i rødt og bart fjell i blått</i> . ....	32
<i>Figur 3-9 Saltmengden påført veien som går over Bø vannverk. Y-aksen er saltmengde i tonn/år og x-aksen er meter veistrekning. Figuren viser tydelig at saltmengden varierer mye</i> . ....	33
<i>Figur 3-10 Veien i blått er i varierende grad innenfor cellene. Dette gjør at saltmengden langs veien varierer mye fra celle til celle i gridet</i> . ....	33
<i>Figur 3-11 Bakgrunnsverdier for salt i grunnvann fra nedbør i nedbørsfeltet i mol/m<sup>3</sup>. Brønnene er markert med sort sirkel</i> . ....	34
<i>Figur 3-12 Modellens grid. Merk høyere oppløsning rundt veien og elva</i> . ....	36
<i>Figur 3-13 Viser nedbørsfeltet som er satt sammen av flere REGINE enheter. De svarte pilene angir at det ikke strømmer vann over modellens grenser – no flow betingelser</i> . ....	37
<i>Figur 3-14 Viser brønnens nedslagsfelt. Den delen av veien som brønnen trekker salt fra er markert med rødt. Infiltrasjon: <math>\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,05</math> og <math>\alpha_{\text{løsmasser}} = 1</math>. Vannet i brønnen består av 1/3 fra Bøelva og 2/3 fra nedbørsfeltet</i> . ....	39
<i>Figur 3-15 Viser to gjennombruddskurver for henholdsvis "extremely fine mesh" og "extremely coarse mesh" i COMSOL (Cadran &amp; Salva 2011). Differansen mellom kurvene skyldes numerisk dispersjon</i> . ....	41
<i>Figur 3-16 Viser nedslagsfeltet til brønnen når infiltrasjonen fra avrenning settes lik 0. Alt vannet trekkes fra elva (markert med tykk blå linje) og strømningslinjene tangerer ikke veien (markert med tykk svart linje)</i> .....	42
<i>Figur 5-1 Viser nedbørsfeltene som er brukt i modellen. Pilen peker på Bø vannverk. Kilde: <a href="http://atlas.nve.no">http://atlas.nve.no</a></i> . ....	47
<i>Figur 5-2 Viser brønnens nedslagsfelt. Infiltrasjon: <math>\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15</math> og <math>\alpha_{\text{løsmasser}} = 1</math>. 1/3 av vannet til brønn trekkes fra Bøelva ved dette infiltrasjonsscenarioet</i> . ....	49



<b>Figur 5-3 Vannføring i Bøelva (m<sup>3</sup>/s) ved Hagadrag målestasjon for perioden 12.03.12 – 08.04.12. Y-aksen viser vannføring og X-aksen måletidspunktet. Kilde: NVE. ....</b>	<b>49</b>
<b>Figur 5-4 Elva Bjønndøla (svart pil) krysser akviferen til Bø vannverk. Røde piler angir tjern lokalisert i akviferen. Brønnen vises med blå ring. Kilde: NGU .....</b>	<b>51</b>
<b>Figur 5-5 Viser verdier for hydraulisk potensiale med infiltrasjon <math>\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15</math> og <math>\alpha_{\text{løsmasser}} = 1</math>. Gradienten er betydelig mindre enn gradienten på topografien i området. ....</b>	<b>52</b>
<b>Figur 5-6 Viser hvordan grunnvannspeilet i blått ikke følger topografien i brunt. Berggrunnen er vannførende i hele dypet. De sorte strekene markerer bunnen av modellen. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figur 5-7 Viser hvordan grunnvannspeilet sannsynligvis vil følge topografien i modellen hvis kun den øverste delen av berggrunnen var vannførende. Den hydrauliske konduktiviteten vil sannsynligvis avta ned i dypet på grunn av økende trykk fra fjellmassene. De sorte strekene markerer bunnen av modellen. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figur 5-8 Hastighets feltet (darcy hastigheten) i modellen angis med sorte piler. Størrelsen på pilene angir hastighetsfeltet relative størrelse. Det er tydelig at vannet strømningsmønster følger topografien ned mot elva. Infiltrasjon: <math>\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15</math> og <math>\alpha_{\text{løsmasser}} = 1</math> .....</b>	<b>54</b>
<b>Figur 5-9 Gjennombruddskurve for klorid (mg/l) i brønnen over et tidsspenn på 30 år. Modellen som er kjørt i dette eksemplet har en infiltrasjon på <math>\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15</math> og <math>\alpha_{\text{løsmasser}} = 1</math>. Maksimum kloridnivå er 37 mg/l. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figur 5-10 Gjennombruddskurve for klorid (mg/l) i brønnen over et tidsspenn på 10 år. <math>\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 1</math> og <math>\alpha_{\text{løsmasser}} = 1</math>. Maksimum kloridnivå er 4,9 mg/l .....</b>	<b>55</b>
<b>Figur 5-11 Longitudinal dispersivitet (<math>\alpha_L</math>) typiske for grunnvannsakviferer på Y-aksen. X-aksen viser transportlengden (Dagan 1989). ....</b>	<b>57</b>
<b>Figur 5-12 Elveoverflate og verdier for hydraulisk potensiale med og uten brønn. Senkningstrakten til brønnen er tydelig der "head med brønn" går under "overflate elv". Y-aksen viser meter over havet og X-aksen viser elvesegmentene langs Bøelva. ....</b>	<b>61</b>

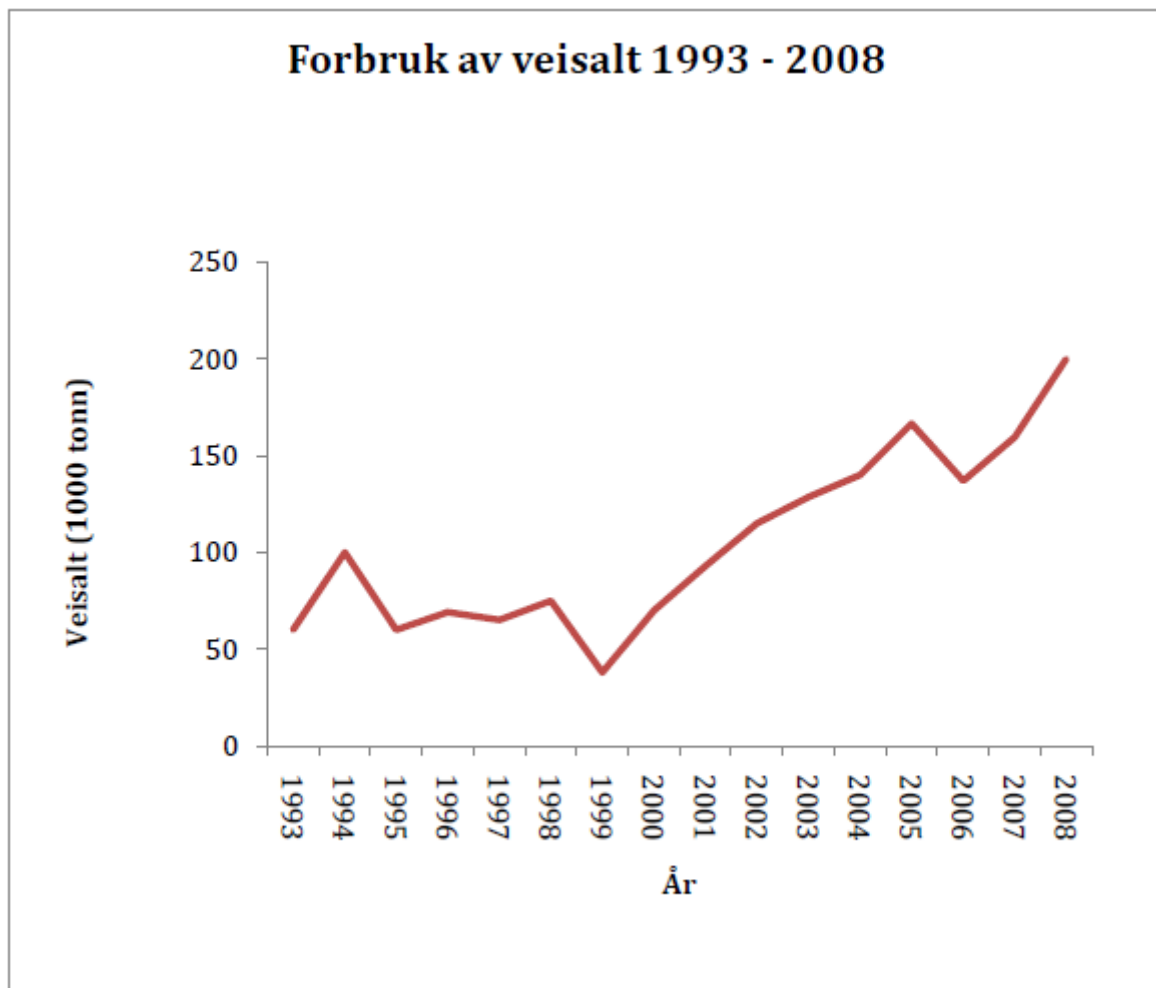
## LISTE TABELLER

Tabell 3.1 Viser vannkjemien i råvannet i brønnene til Bø vannverk ved forskjellige tidspunkt. Kilde: Bø kommune.....	24
Tabell 3.2 Vannkjemien i råvannet, brønn nr 1. målt 21.02.2004. Kilde: NGU sin nasjonale grunnvannsdatabase GRANADA. ....	24
Tabell 3.3 Vannkjemien i Bøelva. Kilde: Høyskolen i Telemark, Tom Aage Aarnes.....	24
Tabell 3.4 Geologiske forhold og menneskelig aktivitet som kan føre til økte kloridkonsentrasjoner i grunnvann. Kilde: Kitterød et al. (2011) .....	28
Tabell 3.5 Eksempel på vektning av avrenning for bart fjell og løsmasser. ....	37
Tabell 3.6 Grensebetingelser og parametre i endelig modell .....	38
Tabell 3.7 Lengden av veien som er påvirket av brønnens nedslagsfelt og kloridkonsentrasjon i brønnen regnet ut med massebalansemetoden ved forskjellige infiltrasjonsscenarioer. ....	40
Tabell 3.8 Kloridkonsentrasjon i brønnen regnet ut med COMSOL og bakgrunnsverdien for klorid i brønnen	42
Tabell 3.9 Konsentrasjonen av klorid i brønnen fra transportlikningen løst numerisk av COMSOL (tidsspenn 30 år) og konsentrasjon av klorid i brønnen regnet ut ved massebalansemetoden. $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,05$ og $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ . ....	43
Tabell 4.1 Viser vannvolumet som brønnen trekker fra Bøelva ( $\text{m}^3/\text{år}$ ). $\alpha_{\text{bart\_fjell}}$ og $\alpha_{\text{løsmasser}}$ angir hvor mye av avrenningen over henholdsvis bart fjell og løsmasser som infiltrerer grunnen (1 =100 prosent, 0 = 0 prosent). ....	44
Tabell 4.2 Viser kloridkonsentrasjon i brønn ved løsning av transportlikningen i COMSOL over et tidsspenn på 30 år og ved massebalansemetoden. $\alpha_{\text{bart\_fjell}}$ og $\alpha_{\text{løsmasser}}$ angir hvor mye av avrenningen over henholdsvis bart fjell og løsmasser som infiltrerer grunnen (1 =100 prosent, 0 = 0 prosent). ....	45
Tabell 4.3 Kloridkonsentrasjon (mg/l) i brønnen funnet ved å løse transportlikningen i COMSOL ved ulik dispersjon. $v$ = porevannshastigheten. Porevannshastigheten varierer romlig. Infiltrasjon i modellen er $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15$ og $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ . ....	45
Tabell 5.1 Viser vannfluksen langs elvesegmentene som Bøelva er delt opp i. Negative verdier angir at elva avgir vann til akviferen. Positive verdier angir at akviferen avgir vann til elva. De negative verdiene befinner seg i nærheten av brønnen. ....	60

## 1 INNLEDNING

### 1.1 Bakgrunn

Veisalt (NaCl) brukes i størst grad som avisningsmiddel i Norge (Amundsen et.al 2008). Det er store mengder veisalt som tilføres veiene i Norge hver vinter, og bruken har økt de siste årene.

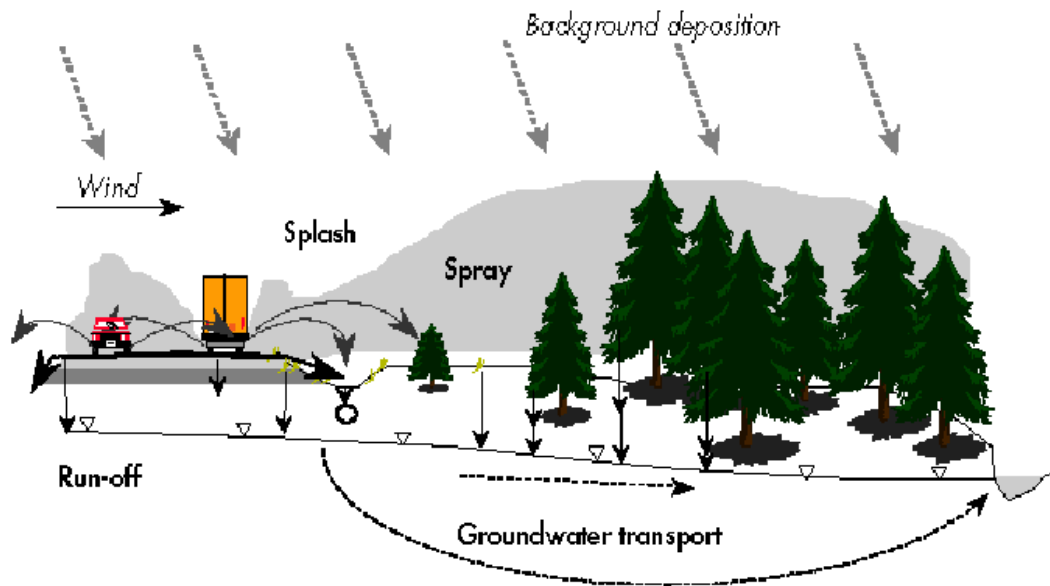


Figur 1-1 Mengder veisalt påført veiene til Statens Vegvesen de siste årene (Sivertsen 2010)

Vinteren 2009/2010 ble det tilført over 200 000 tonn salt langs 55 000 km vei (Breivik 2010). Veisaltet inneholder også mindre mengder av kalsium, magnesium og sulfat (Amundsen & Roseth 2007). Andre kloridbaserte avvisningskemikalier som brukes er kalsiumklorid og magnesiumklorid, men disse brukes i mye mindre grad (Amundsen et al. 2008). Magnesiumklorid brukes hovedsakelig til støvdemping (Aldrin & Steinbekk 2010).

Veisaltet spres til omgivelsene via hovedsakelig tre spredningsmekanismer (Amundsen et al. 2008):

- Spredning i luft
- Spredning ved snøbrøyting
- Spredning ved avrenning



*Figur 1-2 Spredningsprosesser for veisalt fra veien til omgivelsene (Blomqvist 2001).*

Veisalt senker vannets frysepunkt og hindrer dermed isdannelse på veiene om vinteren. Dette øker trafikksikkerheten betraktelig, men veisalt har en rekke negative effekter på miljøet (Amundsen et al. 2008). Det er derfor ønskelig å optimalisere saltingen av veiene, slik at det ikke brukes mer salt enn nødvendig.

Forurensning fra vei kommer fra kjøretøyer, slitasje av vei og fra stoffer som tilsettes ved drift av veien (f. eks veisalt og strøing). Stor trafikk og høy avrenning vil øke forurensningen. Amundsen & Roseth (2004) estimerte totalproduksjonen av forurensning fra vei basert på norske og utenlandske data. Resultatene viste en klar positiv korrelasjon mellom størrelsen på trafikken og forurensning fra vei. Rapporten nevner også salt, tungmetaller, organisk forurensning og næringsstoffer som viktige kontaminanter fra vei i Norge. Legret & Pagotto (1999) fant at avrenning fra motorvei, inneholder store mengder hydrokarboner og tungmetaller. Forurensningen økte i perioder der man brukte avvsningskjemikalier. Kontaminantene adsorberes i jordsmonnet langs veiene. Norrström & Jacks (1998), fant forhøyede verdier av tungmetallene Pb, Cd, Zn og Cu langs vei i Sverige.

## Negative konsekvenser av veisalt

Amundsen et al. (2008), oppsummerte tre negative hovedkonsekvenser av bruk av veisalt:

- 1) Påvirkning av sirkulasjonsforhold i innsjøer på grunn av høye konsentrasjoner av veisalt i vannet.
- 2) For høyt innhold av veisalt i grunnvann. Da særlig problematisk i grunnvann, brukt til drikkevannsforsyninger.
- 3) Negative økologiske effekter på sårbare planter og dyr langs veien, i tillegg til negative konsekvenser på vannlevende organismer i elver og sjøer.

Miljøkonsekvenser for veisalt kan også deles i direkte og indirekte konsekvenser:

### Direkte konsekvenser

- Endring av sirkulasjonsforhold i innsjøer, på grunn av at tetthetsgradienten i sjøen endres (Gibson & Stewart 1972). Dette kommer av at saltholdig avrenningsvann er tyngre enn ferskvann, og vil synke til bunnen. Det tunge bunnvannet gjør sirkulasjon i vannmassene vanskeligere. Dette kan i verste fall føre til meromiktiske forhold (Hakala 2004).
- Akvatisk og terrestrisk flora og fauna skades ved at tålegrensene overskrides.
- Flere land fra EU har rapportert at ved siden av nitrogen, er klorid den vanligste forurensningen i grunnvann, og at klorid ofte er grunnen til at grunnvann har dårlig økologisk status (European Commission 2010).

### Indirekte konsekvenser

- Klorid er lettløselig i vann og lite reaktivt. Dette fører til at klorid ikke holdes igjen i grunnen, men lekkes ut til vannforekomster (Lundmark 2008). Natrium tar del i kjemiske reaksjoner i større grad og holdes mer igjen. Ionebytte vil forekomme mellom Na og hovedsakelig Ca, Mg, og K (Rhodes et al. 2001). Dette kan øke mobiliteten av  $H^+$  ioner, og dermed endre pH i grunnen (Lundmark 2008).
- Høye verdier av Na vil endre jordas kjemiske og fysiske sammensetning, og vil kunne ha effekt på mobiliteten til andre stoffer som tungmetaller og organiske stoffer (Trombulak & Frissel 2000). Natrium kan føre til at aggregater i jorda sprekker opp. Dette kan føre til at tungmetaller blir mer mobile gjennom kolloidal transport (Norrström and Jacks 1998). Dette

kan være spesielt skadelig i drikkevannskilder, der det ikke er renseanlegg og overvåkingssystemer, som ofte er tilfelle med private brønner.

- Økning av tungmetallers mobilitet ved kompleksbinding med klorid (Bauske & Goetz 1993)
- Økt fare for vekst av blågrønn alger som følge av høye natrium konsentrasjoner (Ramakrishna & Viraghavan 2005).
- Oksygenmangel i bunnvann på grunn av økt stratifisering (Ramakrishna & Viraghavan 2005)

## 1.2 Formålet med oppgaven

Flere av Norges større veier går over grunnvannsakviferer som er drikkevannskilder til vannverk.

Disse veiene blir saltet i vinterhalvåret, og dette kan føre til økte saltverdier i drikkevannet.

Problemstilling: Målet med oppgaven er å lage en metode for å modellere transport av klorid fra vei i grunnvannsakviferer, ved å benytte informasjon fra nasjonale hydrologiske og geologiske databaser.

Metodikken som brukes her skal være så generell, at den kan brukes i flere grunnvannsakviferer i Norge uten store tilpasninger.

Å ha en slik metodikk vil være et viktig verktøy for å optimalisere veisalting, slik at ikke tålegrenser overskrides.

Modelleringen vektlegger vannbalansen i stor grad.

Hypotese: Vannbalansen er det viktigste elementet når det gjelder transport av salt i grunnen.

Opgaven er en del av et større prosjekt i regi av Statens Vegvesen – SaltSMART.

## 1.3 Valg av område

SaltSMART prosjektet til Statens Vegvesen har blant annet som mål å utrede miljøskader fra vegsalting. I tillegg er det et mål å lage et klassifiseringssystem for miljøsoner langs veiene, basert på forskjellige tålegrenser og lovpålagte krav for miljøpåvirkninger (Amundsen et al. 2008). I forbindelse med dette arbeidet skal både overflatevann og grunnvannsforekomster vurderes i forhold til sårbarhet for vegsalt.

For at en vannverk skulle være aktuelt å modellere måtte følgende kriterier tilfredsstilles (Sellevoid 2011):

- 1) Vannverket må ligge i nærheten av veier som har registrert bruk av veisalt.

- 2) Vannverket må være definert som en viktig grunnvannsressurs av NGU (Norges geologiske undersøkelse)
- 3) Vannverket må ha et målt uttak av drikkevann
- 4) Det må være målt innhold av klorid og natrium i drikkevannet slik at modellen kan kalibreres
- 5) Det må være så mange brønner som mulig i området. Disse må være registrert i NGU sin grunnvannsdatabase GRANADA, og bør være jevnt distribuert i området. Tykkelsen på løsmassene i modellen utledes fra dybden til disse brønnene.

Bø vannverk tilfredsstiller disse kravene, og ble valgt som det vannverket som skulle modelleres.

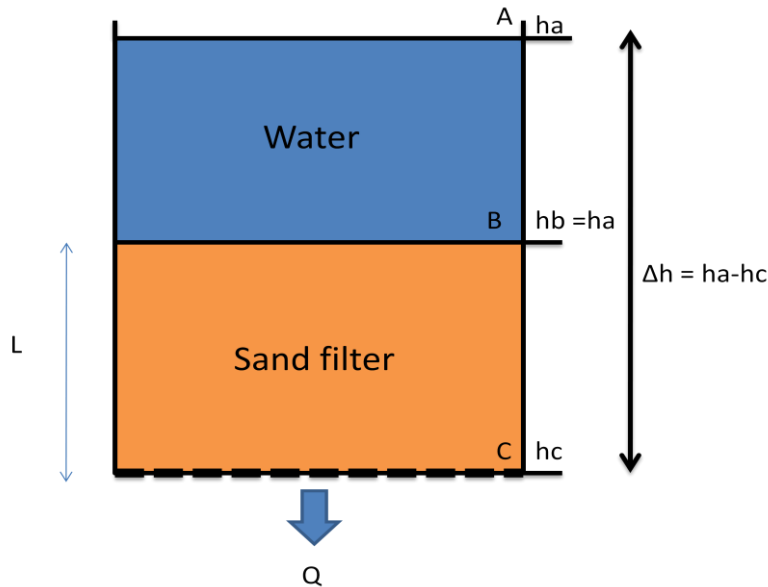
#### 1.4 Tidligere studier

Flere studier har brukt numeriske modeller som verktøy for å forutsi hvordan veisalt påvirker miljøet. Bester et al. (2006) undersøkte en kompleks akvifer bestående av bl.a morene ved hjelp en av 3D numerisk transport modell. De fant at i et komplekst heterogent system kan klorid lagres over lang tid, og dermed også være et problem etter at tiltak har blitt utført. Kristiansen et al. (2009) lagde en 3D modell i verktøyet MIKE SHE for å simulere grunnvannstrømning og transport av veisalt i grunnen København området. Denne modellen ble kombinert med en modell for "salttap" fra vei til grunnvannet. De fant at veisalt kan øke kloridinnholdet i grunnvann betraktelig. Det disse studiene har til felles, er at modellene er i 3D. I tillegg er modellene ganske kompliserte, og geologien i området tillegges stor vekt.

## 2 TEORI

### 2.1 Darcy's lov

I 1856 utførte en fransk ingeniør ved navn Darcy en rekke eksperimenter med vanntransport gjennom en sandkolonne.



Figur 2-1 Viser vann som infiltrerer gjennom et sandfilter (Cadran&Salva 2011).

Darcy kom frem til følgende formel som beskriver vannstrøm gjennom et porøst medium.

$$(1) Q = -KA \left( \frac{\Delta h}{L} \right)$$

- $Q$  = vannvolumet som infiltrerer pr tid [ $L^3/T$ ]
- $K$  = den hydrauliske ledningsevnen [ $L/T$ ]
- $A$  = arealet som vannet infiltrerer [ $L^2$ ]
- $\Delta h$  = differansen i hydraulisk potensiale [ $L$ ]
- $L$  = lengden på sandfilteret [ $L$ ]
- $\left( \frac{\Delta h}{L} \right)$  = den hydrauliske gradienten [-]

Minustegnet angir at vannet flyter fra høyt til lavt hydraulisk potensiale.

Den spesifikke hastigheten til vannet, kalles også Darcy hastigheten:

$$(2) q = \left( \frac{Q}{A} \right) [L/T]$$

Darcy hastigheten kan også skrives slik:



$$(3) \mathbf{q} = -K \left( \frac{\Delta h}{L} \right)$$

Grunnvann strømmes i 3 dimensjoner (x, y, z), og hvis man kjenner h(x,y,z) overalt i akviferen kan man bruke likning (3) til å regne grunnvannstrømmen i alle punkter i akviferen (Haitjema 1995). Som regel er h(x,y,z) ikke kjent overalt. Dermed trengs massebalanselikningen i tillegg.

## 2.2 Massebalanselikningen

Massebalanselikningen baserer seg på forholdet at vann ikke kan oppstå eller forsvinne av seg selv. Det er en massebalanse:

$$(4) \left( \frac{\text{Endring i vannmagasin}}{\text{Tid}} \right) = \text{total vannmengde inn} - \text{total vannmengde ut}$$

For 1D strømning:

$$(5) -h \frac{\partial q_x}{\partial x} = S_p \frac{\partial h}{\partial t} - N$$

- $S_p$  = drenerbar porøsitet [-]
- $N$  = kildeleddet, f.eks i form av nedbør over åpen akvifer [L/T]
- $\partial t$  = endring i tid [T]

Kombinasjon av likning (5) med Darcy's lov:

$$(6) -h \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) = S_p \frac{\partial h}{\partial t} - N$$

Likning (6) kan for åpen akvifer omgjøres til:

$$(7) S_p \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{1}{2} K_x h^2 \right) + N$$

- $\frac{1}{2} K h^2$  kalles også  $\varphi$  eller strømningspotensiale

For 3D grunnvannstrømning i åpen akvifer:

$$(8) S_p \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla^2 \left( \frac{1}{2} K h^2 \right) + N$$

### 2.2.1 Laplace likningen

Laplace likningen uttrykker et spesialtilfelle av massebalanse likningen der

$$(9) \text{Total vannmengde inn} = \text{Total vannmengde ut}$$

Dette kan uttrykkes slik:

$$(10) \quad \frac{\partial qx}{\partial x} + \frac{\partial qy}{\partial y} + \frac{\partial qz}{\partial z} = 0$$

Kombinasjon av likning (10) med Darcy's lov:

$$(11) \quad \frac{\partial q}{\partial x} \left[ -K \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial q}{\partial y} \left[ -K \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial q}{\partial z} \left[ -K \frac{\partial h}{\partial z} \right] = 0$$

gir Laplace likningen:

$$(12) \quad \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Laplacelikningen kan løses for å finne headverdier. Å finne løsninger på Laplace likningen for en reell grunnvannsakvifer, krever en løsning som tilfredsstill et komplekst sett av grensebetingelser (elver, vann, myrer, brønner) på en god måte. Dette er krevende, og en del forenkling og kompromisser i forhold til grensebetingelser må til (Haitjema 1995).

### 2.2.2 Poisson likningen

Poisson likningen et spesialtilfelle av massebalanselikningen med stasjonære forhold (som Laplace likningen), men med et kildeledd i tillegg. Kilden kan være i form av nedbør over en åpen akvifer.

$$(13) \quad \text{Total vannmengde inn} - \text{totalvannmengde ut} = \text{-kilden}$$

I Dupuit-Forchheimer modeller av åpne akviferer er det hendig å uttrykke strømningslikninger ved hjelp av  $\varphi$  (Haitjema 1995).  $\varphi$  gir et uttrykk for hvordan strømningspotensialet endrer seg i akviferen, og er forskjellig definert i åpne akviferer og lukkede akviferer.

I en åpen akvifer:

$$(14) \quad \varphi = \left(\frac{1}{2}\right) Kh^2$$

I en lukket akvifer:

$$(15) \quad \varphi = KHh$$

- H er mektigheten til akviferen [L]
- KH = Transmissivitet [ $L^2/T$ ]

Grunnvannspotensialet (h) kan utledes fra  $\varphi$  gjennom likning 14 eller 10.

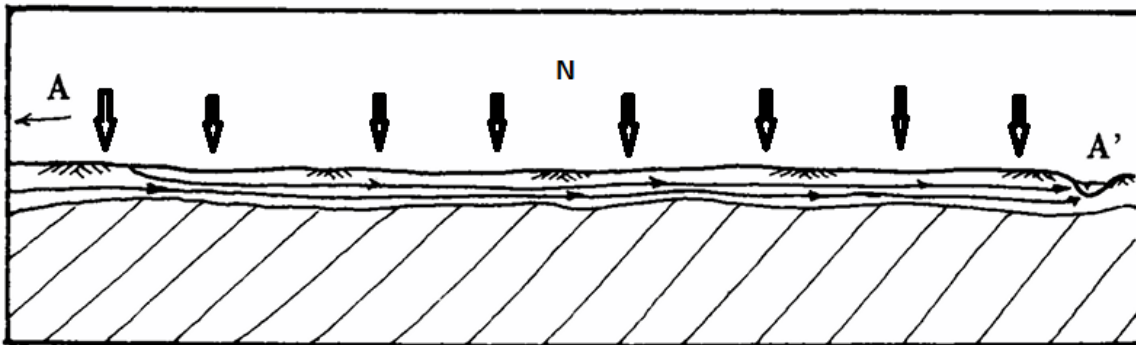
I en Dupuit-Forchheimer modell uttrykkes Poisson likningen slik:

$$(16) \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -N$$

- $N$  er kildeleddet [L/T]

### 2.3 Dupuit-Forchheimer strømning

Jules Dupuit presenterte i 1863 løsninger på regionale grunnvannflyt problemer ved å anta at grunnvannet hovedsakelig flyter i horisontal retning (Haitjema 1995). Dette er basert på at lengden av en akvifer som regel er så mye større enn dybden.



Ved hovedsakelig horisontal flyt er

$$(17) \quad q_z \neq 0$$

Det vil si at det er en vertikal komponent i grunnvannet.

Forskjellen i grunnvannspotensialet er så lite i vertikal retning sammenlignet med horisontal retning at den kan settes til 0:

$$(18) \quad \frac{\partial h}{\partial z} = 0$$

Likning (16) reduserer grunnvannsflyten fra et 3D til et 2D problem. Dette gjør at modeller lettere kan løses numerisk ved hjelp av datamaskiner, da 3D modeller kan kreve veldig mye datakraft for å løses.

### 2.4 Transport og spredning

Transport av et stoff skjer med tre forskjellige fysiske fenomen:

Adveksjon, dispersjon og diffusjon.

### 2.4.1 Adveksjon

Adveksjon er prosessen som beskriver transport av et stoff sammen med vannstrømmen. I vann som er i bevegelse, er denne transportformen den viktigste. Dispersjon og diffusjon kommer i tillegg, men er mindre viktige.

Adveksjon kan uttrykkes slik:

$$(19) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x}$$

- $C$  = konsentrasjonen [ $M/L^3$ ]
- $v = q/\varepsilon$  [ $L/T$ ]
- $\varepsilon$  er effektiv porøsitet
- $\frac{\partial C}{\partial t}$  er konsentrasjonsgradienten over tid [ $M/(L^3 \cdot T)$ ]
- $\frac{\Delta C}{\Delta x}$  = konsentrasjonsgradienten i rommet [ $M/L^3/L^2$ ]

### 2.4.2 Diffusjon

Diffusjon er en viktig spredningsprosess i stillestående vann, men ikke når vannet beveger seg med en viss fart. Da er dispersjon viktigere.

Et stoff løst i vann vil bevege seg fra høy konsentrasjon mot områder med lavere konsentrasjon.

Dette kan uttrykkes ved Fick's 1.lov:

$$(20) \quad F = -D \left( \frac{\Delta C}{\Delta x} \right)$$

- $F$  = flux av stoffet [ $M/L^2 \cdot T$ ]
- $D$  = diffusjonskoeffisienten [ $L^2/T$ ]
- $C$  = konsentrasjonen [ $M/L^3$ ]
- $\frac{\Delta C}{\Delta x}$  = konsentrasjonsgradienten [ $M/L^3/L^2$ ]

Hvis konsentrasjonen endrer seg over tid gjelder Fick's 2.lov:

$$(21) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Stoff som diffunderer i et porøst medium har lenger reisevei enn et stoff som diffunderer kun i vann.

Dette kommer av at stoffet må ta veien rundt sedimentkornene. Dette forholdet kan uttrykkes slik:

$$(22) \quad D^* = \omega D$$

- $\omega$  er slyngningskoeffisienten (tortositetskoeffisienten)
- $D^*$  = effektiv diffusjonskoeffisient [ $L^2/T$ ]

### 2.4.3 Dispersjon

Dispersjon oppstår i en akvifer fordi vannet tar forskjellige veier rundt sedimentkornene og på den måten spres vannet utover. Fick's 1. og 2. lov gjelder også for dispersjon, men da er koeffisienten  $D$  en dispersjonskoeffisient. Når vannet ikke er stillestående vil dispersjon være en viktigere spredningsprosess enn diffusjon.

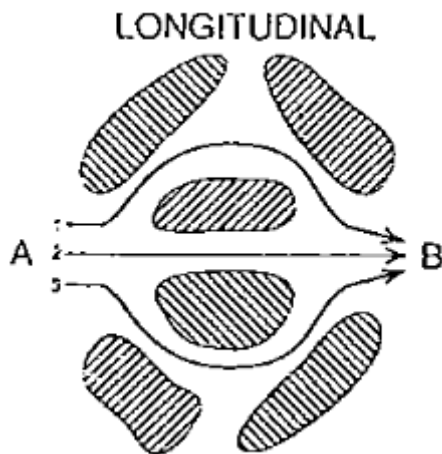
Diffusjon og dispersjon er to mekanismer som er avhengige av hverandre, og blir derfor samlet i begrepet hydrodynamisk dispersjon som angir den totale dispersjonen. Dispersjon kan deles i  $D_L$  - longitudinal dispersjon og  $D_t$  - transversal dispersjon.

$$(23) \quad D_L = \alpha_L v + D^*$$

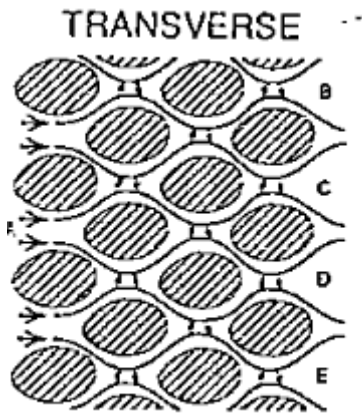
- $\alpha_L$  = longitudinal dispersivitet [L], egenskap til mediet
- $v$  = vannets reelle hastighet

$$(24) \quad D_T = \alpha_T v + D^*$$

- $\alpha_T$  = transversal dispersivitet [L], egenskap til mediet
- $v$  = vannets reelle hastighet



*Figur 2-3 Longitudinal dispersjon. Dispersjonen oppstår som et resultat av forskjeller i transportvei på grunn av at vannet velger forskjellige veier rundt sedimentkornene (Appelo & Postma 1993).*



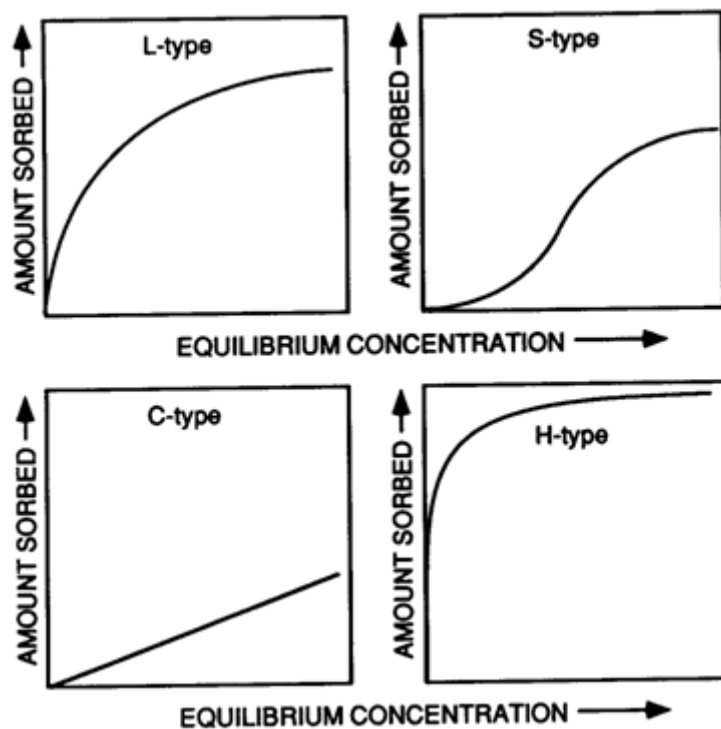
Figur 2-4 Transversal dispersjon. Dispersjonen oppstår på tvers av strømlinjene på grunn av diffusjon mellom strømningslinjer (Appelo & Postma 1993).

$$(25) \quad \alpha_i = \frac{D_i}{v}$$

- $\alpha_i$  er dispersivitet i retning  $i$  [L]
- $D_i$  er dispersjonskoeffisient i retning  $i$  [ $L^2/T$ ]
- $v$  er porevannshastigheten [L/T]

#### 2.4.4 Sorpsjon

Sorpsjon er endringen av massen til et stoff i fast fase. Med andre ord i hvilken grad et stoff binder seg kjemisk og fysisk til partiklene. Sorpsjon innbefatter både adsorpsjon og desorpsjon. Adsorpsjons isotermer beskriver likevekten mellom mengden adsorbent stoff i sedimentene, og mengden av stoffet løst i porevannet ved en fast temperatur. Isotermene vil ha forskjellig form for forskjellige stoffer. Mengden stoff som blir adsorbent, er positivt korrelert med mengde leire og organisk materiale til stede i jorda.



Figur 2-5 Viser typiske former for isotermer (Giles et al. 1960). X-aksen viser mengden av stoffet i fast fase, Y-aksen viser mengden av stoffet i væskefasen.

Sorpsjon er enten et sluk eller kilde, ettersom om adsorpsjon eller desorpsjon er den dominerende prosessen. Sorpsjon kan uttrykkes slik:

$$(26) \quad F = -\frac{B_d}{\theta} \frac{\partial C^*}{\partial x}$$

- $B_d$  = totale tettheten til akviferen [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $\theta$  = porøsitet [-]
- $C^*$  = konsentrasjon i løsning [ $\text{mg}/\text{kg}$ ]
- $x$  = Lengden i strømningsretningen

#### 2.4.5 Transportlikningen

Transportlikningen beskriver hvordan konsentrasjonen til et stoff endrer seg over tid. I 1D kan den se slik ut:

$$(27) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v * \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{B_d}{\theta} \frac{\partial C^*}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial t} \text{ reaksjon}$$

Transportlikningen består av prosessene dispersjon, adveksjon, sorpsjon og reaksjon (f.eks nedbrytning).

### 3 MATERIALE OG METODE

#### 3.1 Valg av modelleringsverktøy

I denne oppgaven brukes COMSOL Multiphysics versjon 4.2a som modelleringsverktøy. COMSOL kan modellere de fleste fysiske fenomen, og er ikke rettet spesielt mot modellering av grunnvann.

Allikevel kan COMSOL brukes til å modellere grunnvannstrømning gjennom porøst medium som en akvifer, i både 3D og 2D. COMSOL modeller kan lagres som MATLAB kode og som Java program.

Dette gir en fleksibilitet til å kunne spesialtilpasse modellen til egne behov. Slik spesialtilpasning har ikke vært gjort i denne oppgaven, men kan være et fremtidig behov.

COMSOL er en numerisk modell som bruker endelig element metoden (FEM). Prinsippet bak denne metoden er å dele modellens domene opp i et grid. I hvert element i gridet, finner modellen en løsning på PDE'en (partiell differensial likning) som beskriver problemet. Løsningene i alle elementene i gridet skal i sum beskrive fenomenet for hele modellen (Haitjema 1995).

Et annet numerisk modelleringsverktøy som er spesielt rettet mot grunnvannsproblemer er Visual Modflow. Dette verktøyet bruker endelig differanse metoden (FDM). FDM bruker et rektangulært grid. I hvert element i gridet erstattes PDE'en med et sett av endelig differanse likninger som så løses med en datamaskin (Haitjema 1995). Visual Modflow brukes som styringsverktøy i forhold til overvåking av vannbalansen på Oslo lufthavn (Amundsen et al. 2008).

Et problem som kan oppstå ved både FEM og FDM metodene er numerisk dispersjon. Numerisk dispersjon må identifiseres og gjøres så liten som mulig ved å ha høy oppløsning på gridet til modellen.

Eksempler på andre modelleringsverktøy som kan modellere i både mettet og umettet sone er Feflow, SUTRA\_2D3D og Hydrus.

#### 3.2 Vannkjemi

Vannkjemien i brønnvannet er levert av Bø kommune. En måling er hentet fra NGU sin nasjonale grunnvanndatabase, GRANADA. Høyskolen i Telemark, ved Tom Aage Aarnes, leverte vannkjemi data for Bøelva.



Tabell 3.1 Viser vannkjemien i råvannet i brønnene til Bø vannverk ved forskjellige tidspunkt. Kilde: Bø kommune

Dato	Brønn	Fe (µg/l)	Mn (µg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)
28.03.11	1	51	140	11,9
20.06.11	1	67	100	4,1
04.01.12	1	134	150	18,4
10.04.12	1	197	138	18,4
23.04.11	2	19	32	13,7
12.09.11	2	161	121	14,8
30.01.12	2	153	104	25
28.02.12	2	154	73	22,4
19.11.10	3	19	30	22,7
16.08.11	3	19	25	11,4
10.10.11	3	19	29	15,2
07.11.11	3	19	33	14,6

Tabell 3.2 Vannkjemien i råvannet, brønn nr 1. målt 21.02.2004. Kilde: NGU sin nasjonale grunnvannsdatabase GRANADA.

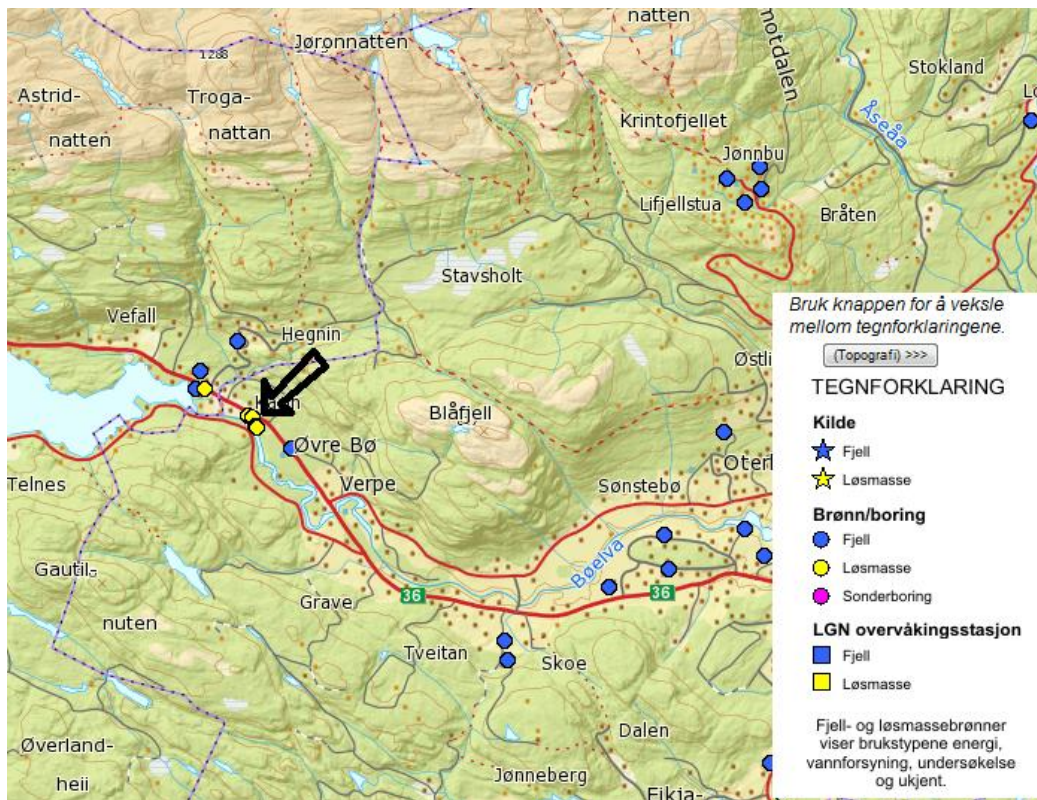
Dato	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe	Mn
21.02.04	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
	7,84	3,51	2,67	3,99	0,81	5,04	0,74	0,03	0,018

Tabell 3.3 Vannkjemien i Bøelva. Kilde: Høyskolen i Telemark, Tom Aage Aarnes.

Dato	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cu
	mg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l
01.09.12	1,74	1,30	113,8	2,60	0,33	23,54	1,17	0,46	1,1
19.09.12	1,37	1,06	75,52	1,62	0,21	<1	0,80	0,19	0,4

### 3.3 Beskrivelse av brønner

Bø vannverk består av tre løsmassebrønner. Disse bytter på å trekke vann, og blir modellert som et sluk, da de befinner seg i samme område. Detaljer rundt brønnene tas ikke med i modellen. Det som vektlegges er hvor mye vann som trekkes ut årlig. Vannmengden som brønnene trekker totalt er ca  $0,8 * 10^6 \text{ m}^3/\text{år}$ . I oppgaven omtales de tre brønnene som en brønn.



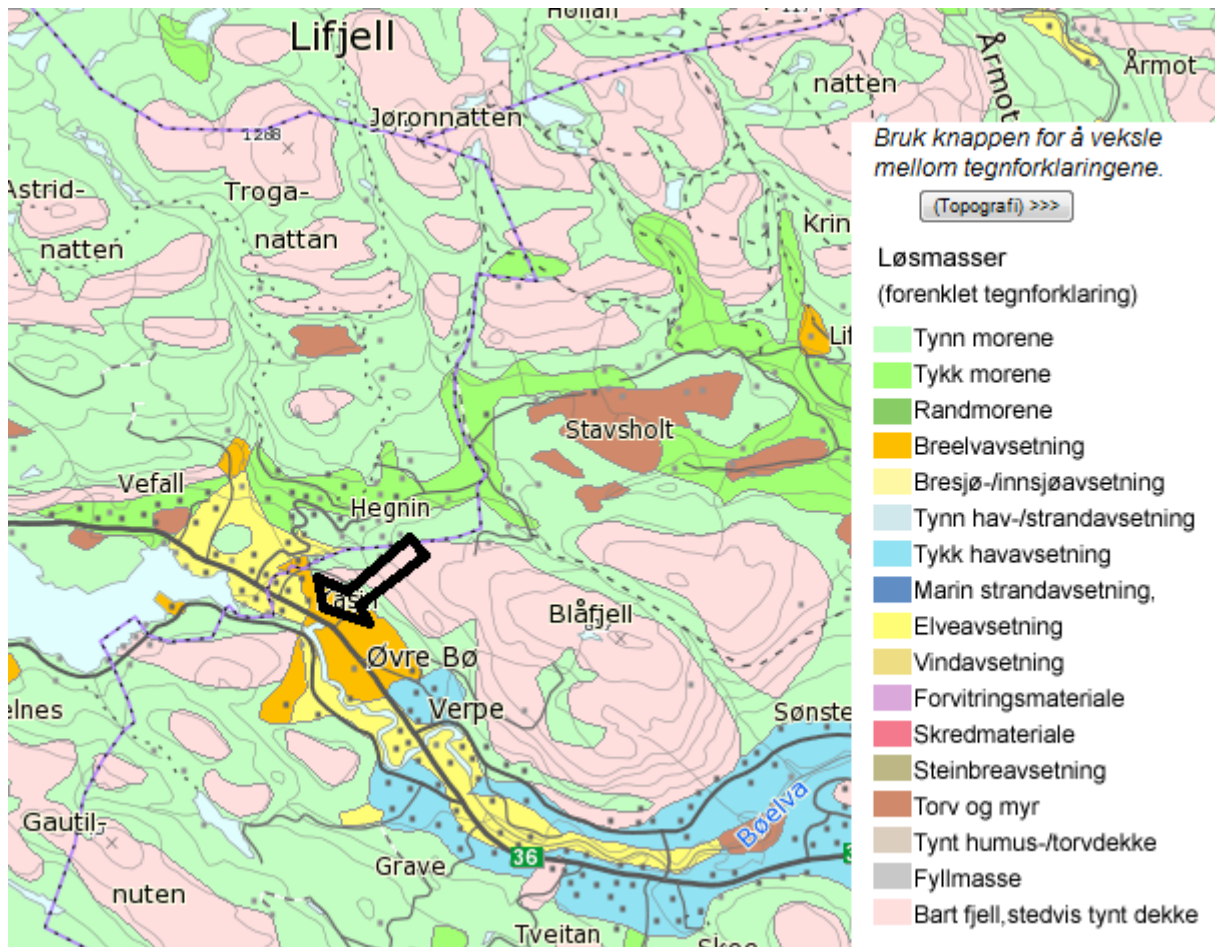
Figur 3-1 Den svarte pilen peker på de tre brønnene i gult som Bø vannverk består av. I denne oppgave blir disse brønnene modellert som en brønn. Kilde: NGU

### 3.4 Områdebeskrivelse

Akviferen for Bø vannverk ligger i Hagadrag øverst i Bøelva mot Seljordsvannet. Riksvei 36 blir saltet i vinterhalvåret og går over grunnvannsakviferen. Klorid fra veisaltet vil komme i drikkevannet hvis nedslagsfeltet til brønnen krysser veien.

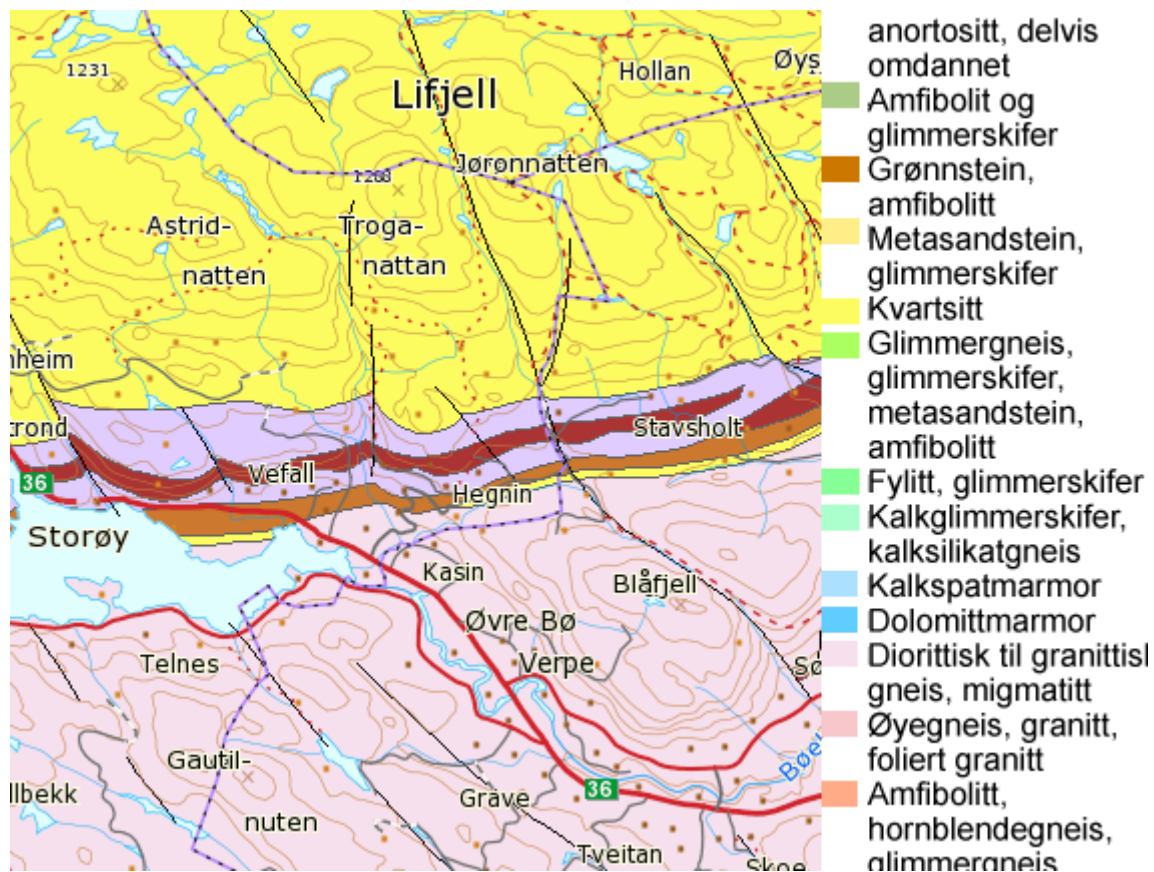
Bø vannverk ligger i en glasifluvial avsetning øverst i Bøelva, like ved sydenden av Seljordsvannet, i Telemark fylke i Sør-Norge.

Langs Bøelva finnes det glasifluviale, fluviale og marine avsetninger (se figur 3-2). Bø vannverk ligger i glasifluviale avsetninger. De marine avsetningene viser at deler av området ligger under marin grense fra siste istid. Det er store områder med bart fjell og tynn morene. Noen områder er dekket med tykk morene.



Figur 3-2 Løsmassekart der pilen peker på området hvor Bø vannverk ligger. De orange og gule feltene er henholdsvis glasifluviale og fluviale avsetninger som kan egne seg for løsmassebrønner. Kilde: NGU

Bergartene i området er preget av store områder med metamorfe bergarter som gneis og kvartsitt (se figur 3-3). Sør i området er det diorittisk til granittisk gneis som dominerer, mens i nord på Lifjell er det kvartsitt som er den dominerende bergarten. I området mellom er det et belte med magmatiske bergarter som basalt, gabbro og ryolitt. Disse bergartene er tette, og vanngiverevnen er bestemt av grad av sprekkdannelser.



Figur 3-3 Berggrunnskart over området. Kilde: NGU

### 3.5 Kloridkilder

Kloridkildene i modellen er veisalt og bakgrunnsverdier for salt i grunnvannet. Andre kilder er ikke undersøkt, men det finnes flere mulige kloridkilder i området. Ved Bø vannverk kan det være marine leirer under glasifluviale og fluviale avsetninger. Lenger nedstrøms langs Bøelva er det marine leirer i dagen. Det er også landbruk i området.

Tabell 3.4 viser en oversikt over mulige kloridkilder.

Tabell 3.4 Geologiske forhold og menneskelig aktivitet som kan føre til økte kloridkonsentrasjoner i grunnvann. Kilde: Kitterød et al. (2011)

	Kilder til salt i grunnvannet
Geologiske forhold	Kystnærhet - Inntrengning av saltvann og tilførsel fra nedbør
	Under marin grense - Relikt salt
Menneskelig påvirkning	Vegsalt
	Lekkasje fra avfallsdeponier, avløpsanlegg og avløpsledninger
	Husdyrsgjødsel og kunstgjødsel fra landbruk

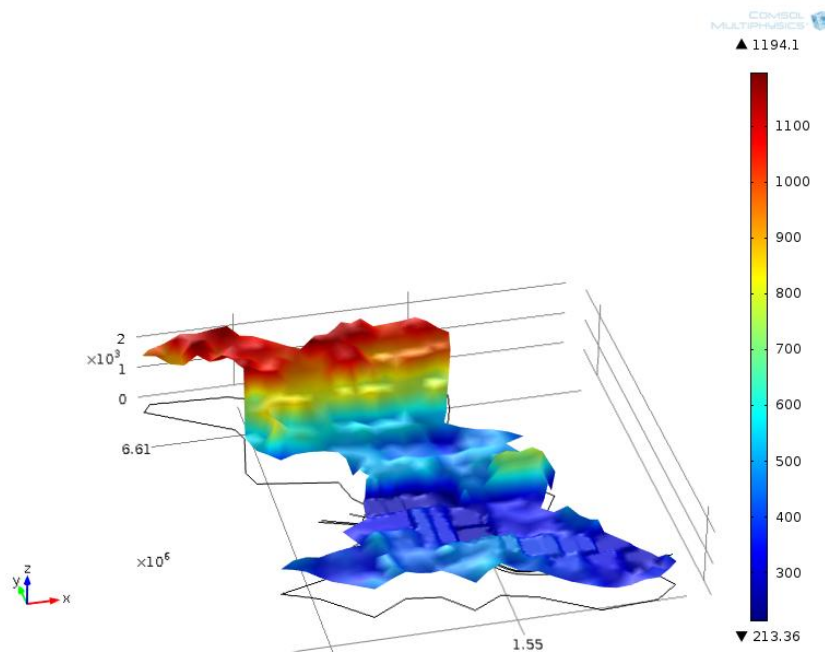
### 3.6 Beskrivelse av inndata

Dataene til modellen har blitt levert av Statens vegvesen, UMB (Universitetet for miljø- og biovitenskap), Bioforsk, NVE (Norges vassdrags- og energidirektorat), NGU (Norges geologiske undersøkelse) og NILU (Norsk institutt for luftforskning). Andre data har blitt fremskaffet ved hjelp av GIS verktøy, og deretter i noen tilfeller blitt viderebehandlet ved hjelp av MATLAB. Dataene blir presentert i grid filer med tre kolonner(x,y,z). Disse filene kan sammenlignes med regneark med kolonner og rader. Kartkoordinater angis av x og y kolonnene. Kartprojeksjonen til kartkoordinatene er UTM33. Selve databæreren angis av z kolonnen. Dette kan være høyde over havet eller avrenning alt ettersom hvilke data som representeres i filen. COMSOL har god funksjonalitet for å importere store filer. Dette kan gjøres med filer i forskjellige format, men her er valgt å ha dataene representert som gridfiler (for beskrivelse av filimport i COMSOL, se vedlegg A-9). Modellen bruker data som avrenning, saltmengder tilført vei, topografi, mektighet løsmasser og bakgrunnsverdier for salt.

#### 3.6.1 Avrenning i nedbørsfeltet

Avrenningsdata baserer seg på målinger og beregninger utført av NVE (Norges Vassdrags og Energidirektorat)(Kitterød et al. 2010). Metodikken som er brukt er beskrevet i Beldring et al. (2002;2003). Disse dataene baserer seg på NVE's database for vannføringsmålinger. Usikkerheten i avrenningsdataene varierer romlig fra  $\pm 5$  prosent til  $\pm 20$  prosent (Beldring et al. 2002).

Det er definitivt mest avrenning i de høyere fjellområdene, mens det er minst i de lavere områdene rundt Bøelva (se figur 3-4).



Figur 3-4 Viser fordelingen av avrenning i mm/år i nedbørsfeltet som er modellert.

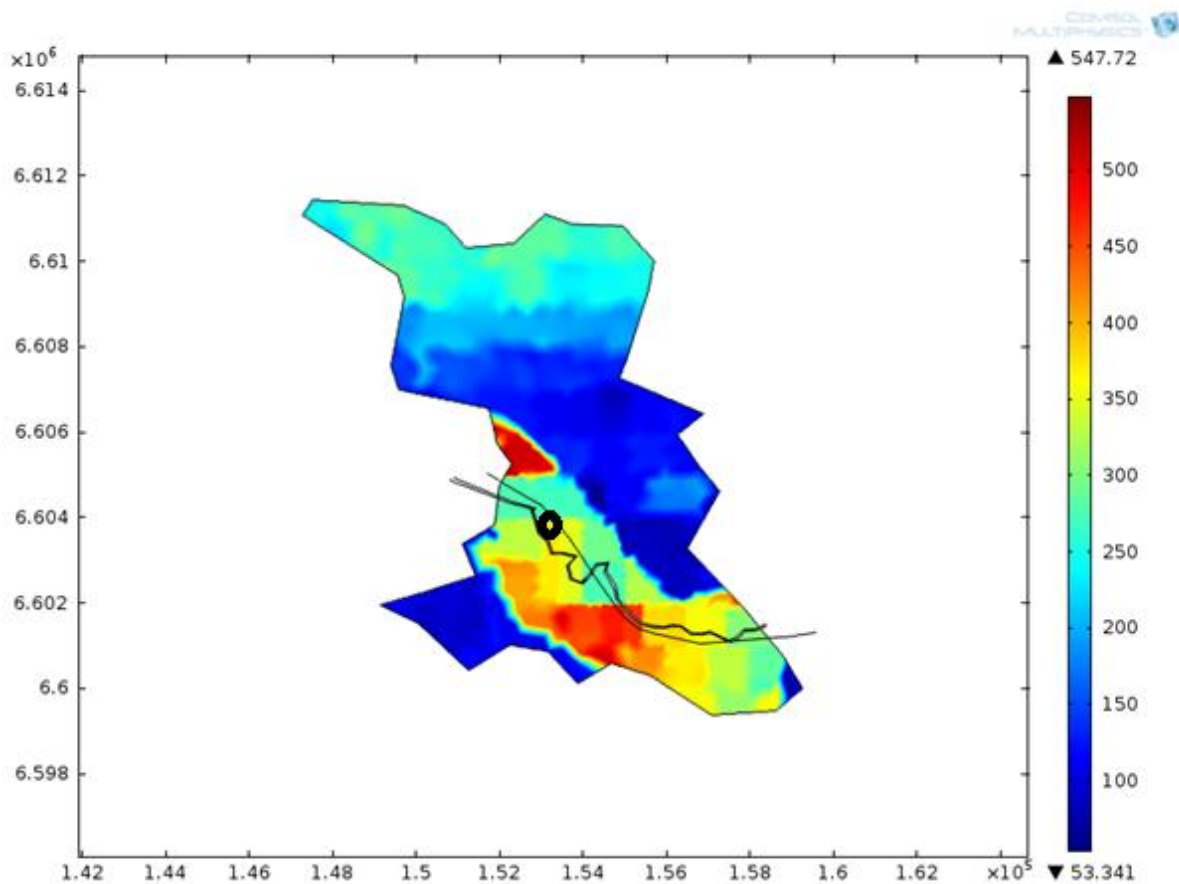
Et viktig element i modellen er i hvor stor grad avrenningen skjer i grunnen eller som overflateavrenning. Det er kun det vannet som infiltrerer grunnen som blir en del av vannbalansen i modellen. Derfor blir infiltreringen av avrenningen vektet. Det skilles mellom områder der det er løsmasser og der det er fjell i dagen. Der det er bart fjell vektet avrenningen med  $\alpha_{\text{bart\_fjell}}$  og i resten av modellen vektet avrenningen med  $\alpha_{\text{løsmasser}}$ . Vektene kan variere fra 0 til 1. Når  $\alpha = 1$  betyr det at all avrenningen infiltrerer modellen og 0 betyr at all avrenningen går som overflateavrenning.

$$\text{Total avrenning infiltrert i bart fjell} = \text{avrenning} * \alpha_{\text{bart\_fjell}}$$

$$\text{Total avrenning infiltrert i løsmasser} = \text{avrenning} * \alpha_{\text{løsmasser}}$$

I de høye fjellområdene hvor det er mest avrenning, er det sannsynlig at en mindre andel av avrenningen infiltrerer grunnen enn i områder med mer løsmasser. Figur 3-5 viser hvordan

fjellområdene bidrar med vann i modellen når  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ .

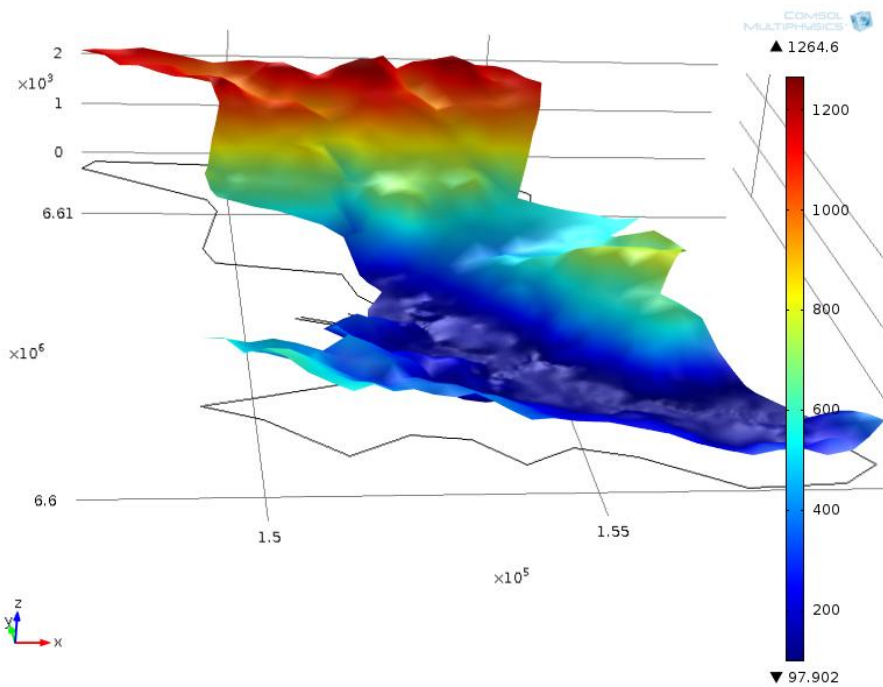


Figur 3-5 Viser hvor mye vann som infiltrerer grunnen i modellen ved  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ . Brønnområdet er markert med sort sirkel.

### 3.6.2 Topografi

Topografi data ble lastet ned som DEM (Digital Elevation Model) filer fra Norge Digitalt ([http://www.statkart.no/Norge\\_digitalt/Norsk/Metadata/Nedlasting\\_av\\_data/](http://www.statkart.no/Norge_digitalt/Norsk/Metadata/Nedlasting_av_data/)). Deretter ble DEM filene importert til GIS (Se vedlegg B-1 for fremgangsmåte i Arcmap 10). I dette GIS programmet finnes det funksjonalitet for å ekstrahere høydedatene til en fil, som deretter importeres til COMSOL.

Topografien i området som modelleres er preget av store gradienter der de høyeste delene opp mot Lifjell ligger på ca 1260 m, og de laveste ned mot nedre del av Bøelva ligger på litt under 100 m (se figur 3-6).



*Figur 3-6 Viser topografien i 3D. Varierer fra 1264.6 m til 97.9 m. Elva går i det mørkeblå område som strekker seg over modellen.*

### 3.6.3 Løsmasser

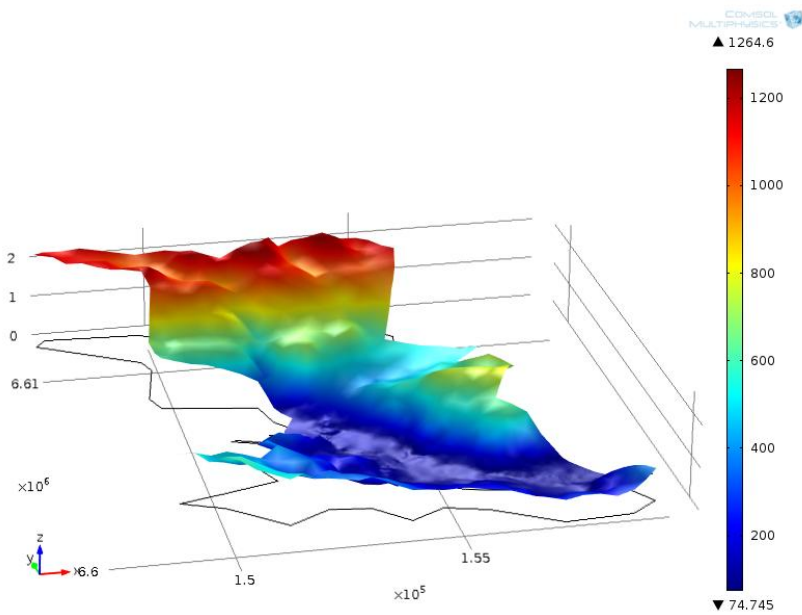
Data for mektigheten på løsmassene er et resultat av arbeid gjort av Nils Otto Kitterød (UMB) og Cammille Jouin (Bioforsk). Løsmassemektheten utledes fra data om dybden til løsmassebrønner og avstand til bart fjell. Brønndataene ble levert av NGU. Hypotesen er at jo lenger unna fast fjell man befinner seg, jo dypere er løsmassene (Kitterød et al. 2011). Dette kan føre til at det blir for tykke løsmasser i midten av et dalføre da modellen lager en V-formet dalbunn under løsmassene. I realiteten vil denne formen ofte være mer avrundet som en U (Cammille Jouin 2011). Dette vil derimot ikke gi store feil i modellen da midten av dalføret og løsmassebrønnene stort sett befinner seg på samme sted.

Dataene dekket et geografisk et område som ble vurdert for lite til Bø vannverk. MATLAB ble brukt til å utvide gridet og interpolere mektigheten på løsmassene ut fra de eksisterende data (se vedlegg C-1 og vedlegg C-2).

Dataene er i utgangspunktet representert som tykkelse på løsmassene. I modellen er det mer nyttig å ha dataene representert som selve topografien til grunnfjellet. Derfor ble berggrunnstopografien utledet fra topografi og løsmasser i MATLAB og lagret i en fil (se vedlegg C-3).

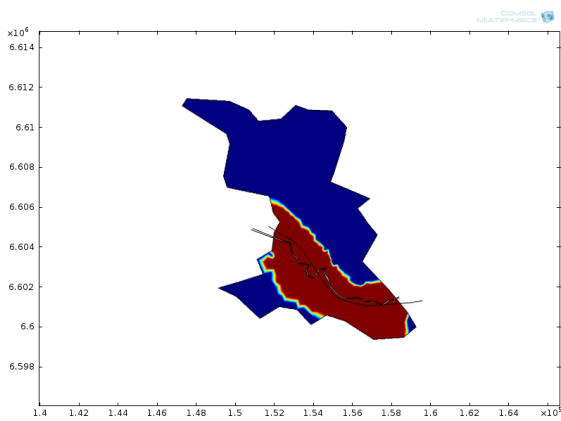
**Topografi – løsmasser = Berggrunnstopografi**





*Figur 3-7 Viser berggrunnstopografien. Den er veldig lik topografien i figur 3-6, men har lavere minimumsverdi på 74,7 m. Differansen skyldes mektigheten til løsmasser.*

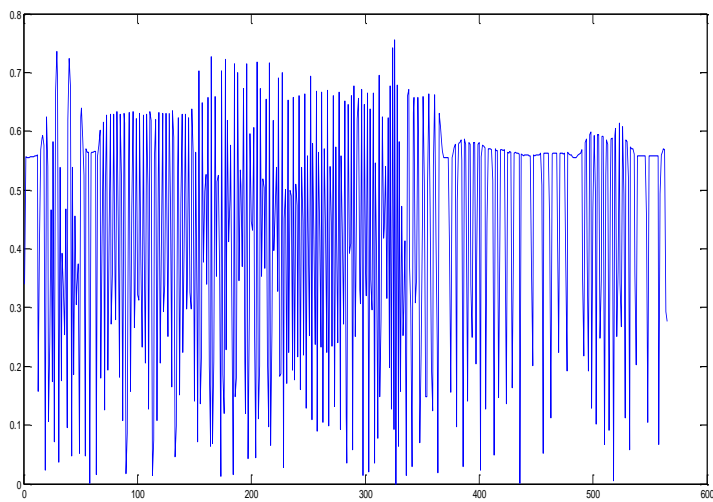
Store deler av området i modellen angis som bart fjell (se figur 3-8). Dette stemmer bra med feltbefaring der det var tydelig at fjellområdene var skrinne med lite løsmasser.



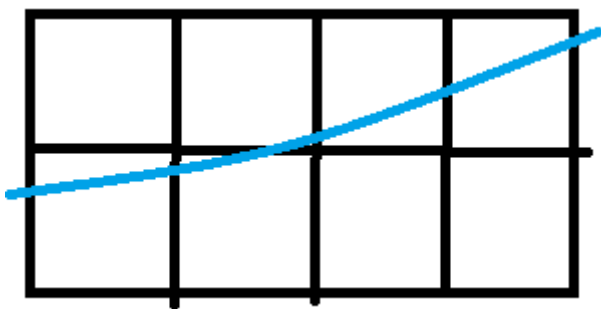
*Figur 3-8 Viser løsmasser i rødt og bart fjell i blått.*

### 3.6.4 Salt på vei

Data om mengde og lokasjon for salting har blitt levert av Statens vegvesen. Disse dataene har blitt prosessert av Camille Jouin (Bioforsk) til en 25\*25 m grid. Gridet representeres som en  $fil(x,y,z)$ . Gjennomsnittlig saltforbruk ( $z$ ) er beregnet i hver rute i gridet. Saltmengden er gjennomsnittlig saltforbruk for perioden 2005 – 2008 (Kitterød et al. 2010). Saltmengden i gridet varierer mye (se figur 3-9). Grunnen til dette er at veien i varierende grad er innenfor de forskjellige cellene i gridet (se figur 3-10).



*Figur 3-9 Saltmengden påført veien som går over Bø vannverk. Y-aksen er saltmengde i tonn/år og x-aksen er meter veistrekning. Figuren viser tydelig at saltmengden varierer mye.*



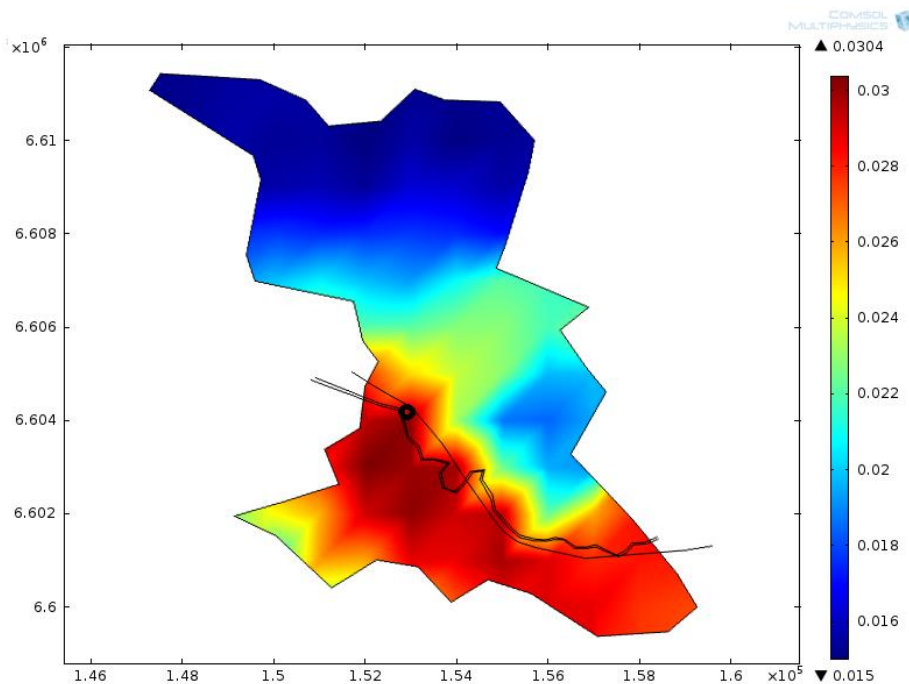
*Figur 3-10 Veien i blått er i varierende grad innenfor cellene. Dette gjør at saltmengden langs veien varierer mye fra celle til celle i gridet.*

Det blir mer praktisk å ta utgangspunkt i en gjennomsnittsverdi for saltmengden som legges på veien når saltet skal tilføres modellen. Dette gjøres ved å summere saltmengden langs vegstrekningen i modellen og dele på lengden av vegstrekningen.

Gjennomsnittlig saltmengde langs veien er 25,8 tonn/km/år.

### 3.6.5 Bakgrunnsverdier salt i grunnvann

Bakgrunnsverdiene av salt i grunnvann er basert på data om vannbalanse fra NVE og klorid konsentrasjon i nedbør fra NILU. Disse dataene har blitt videre behandlet av Nils Otto Kitterød (UMB) og Camille Jouin (Bioforsk). Saltverdiene er en funksjon av avstand til havet, og har en oppløsning på 1\*1 km. Det ble også korrigert for høyere klorid konsentrasjon i grunnvann enn i nedbør på grunn av evapotranspirasjon fra planter og jord (Kitterød et al. 2011). Dataene ble videre prosessert i MATLAB for å få en fil (se vedlegg C-4) over det ønskede området, til import i COMSOL.



Figur 3-11 Bakgrunnsverdier for salt i grunnvann fra nedbør i nedbørsfeltet i mol/m<sup>3</sup>. Brønnene er markert med sort sirkel.

## 3.7 Modellen

### 3.7.1 Innledning

Numerisk modellering er en forenkling av virkeligheten som prøver å vektlegge de parametrene som er viktigst og ignorerer parametre som er mindre viktige. Hvilke forhold som vektlegges mest, vil variere med hvilke problem som skal løses.

Denne modellen skal være så forenklet som mulig med akseptabel usikkerhet. De elementene som tillegges mest vekt er vannbalansen og saltmengden som tilføres veien. Dette gjøres ut fra en

hypotese om at vannmengden vil bestemme hvor mye saltet tynnes ut. Det betyr at modellen har en tilnærming der grensebetingelsene (vannbalanse og saltmengder) er i fokus.

Hvis det er mulig å ha denne forenklete tilnærmingen uten krevende kartlegging i felt, så vil det kunne spare tid og penger.

Akviferen modelleres som en åpen akvifer, der infiltrasjon av vann skjer ved nedbør og transport fra elv og fjellsider. Riksvei 36 går over akviferen, og den saltes med gjennomsnittlig 25,8 tonn/km/år (basert på tall fra perioden 2005-2008).

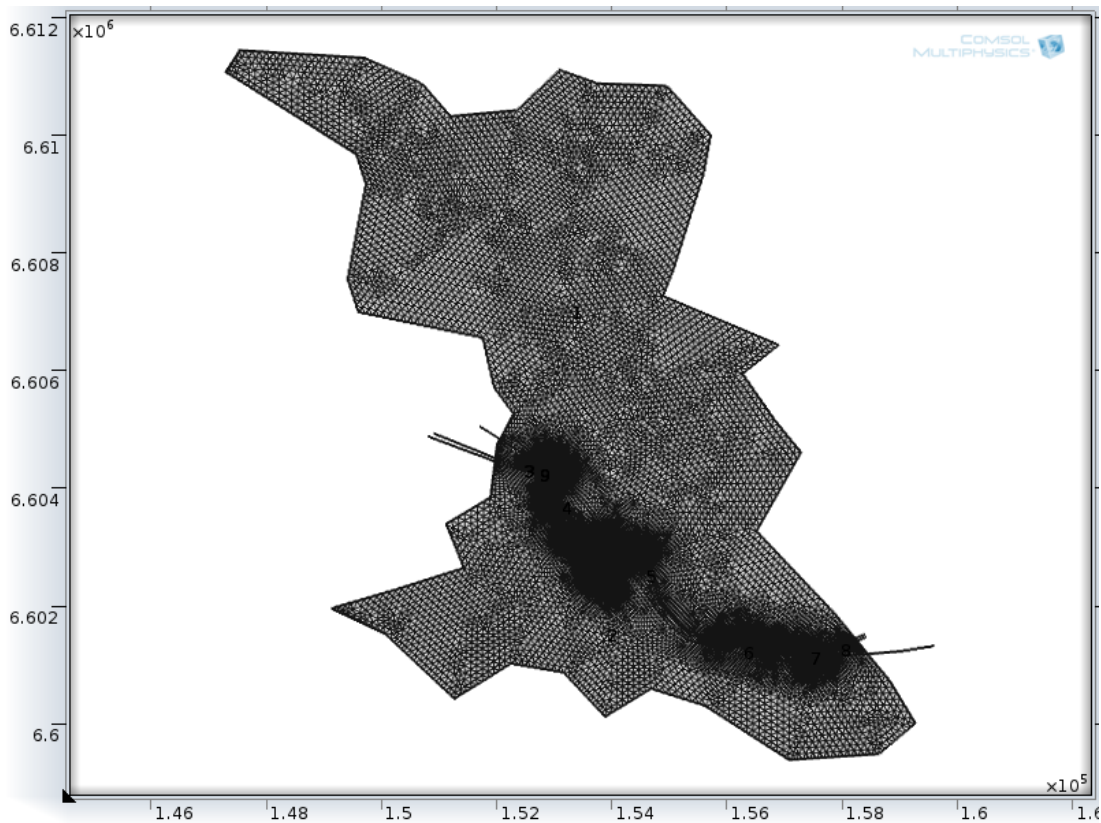
Modellen er i 2D etter Dupuit-Forchheimer forutsetningen (se kapittel 2.3). For detaljert beskrivelse av hvordan modellen bygges i COMSOL, se vedlegg A.

### 3.7.2 Arbeidsprosessen med modellen

For å kvalitetssikre modellen, har enkle test modeller blitt brukt, for å kontrollere at inndata blir lagt til modellen på riktig måte.

### 3.7.3 Grid

COMSOL deler opp modellen i et grid (se figur 3-12). I hver rute i gridet regnes det ut resultater for PDE'ene som skal løses. Eksempler på slike PDE'er er Darcy's lov (Poissons likning), transportlikningen og inndata som topografi, grunnfjell og bakgrunnsverdier for salt. Jo finere gridet er jo mer nøyaktig blir utregningene, og graden av feil som numerisk dispersjon blir mindre. I denne modellen er det blitt brukt COMSOL's fineste default grid – "extremely fine mesh". COMSOL gjør gridet finere der det er detaljer i modellen, som elv og vei. Å forfine gridet ytterligere ble prøvd, men da ble kjøretiden uholdbar lang. Oppløsningen på gridet blir altså et kompromiss mellom nøyaktighet og tiden det tar for modellen å kjøre.



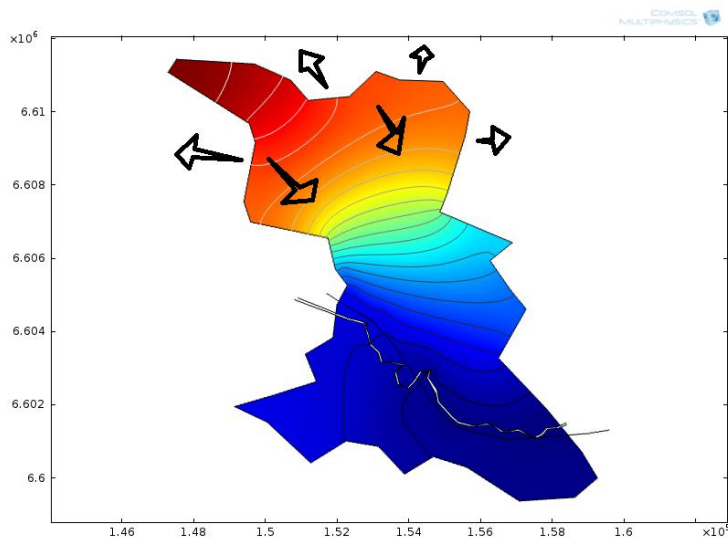
Figur 3-12 Modellens grid. Merk høyere oppløsning rundt veien og elva.

### 3.7.4 Darcy' lov

Modellen løser Darcy's lov stasjonært. Det betyr at vannmengden ikke endrer seg med årstidene, og at hastighetsfeltet er konstant.

### 3.7.5 Grensebetingelser

Yttergrensene for modellen er no-flow grensebetingelser. Grensene ble bestemt ut fra topografi og følger NVE sin oppdeling av området i Regine enheter (se figur 3-13). Dette gjør at modellen dekker et stort geografisk område, hvor det er stor sannsynlighet for at no-flow grensebetingelsene langs ytterkanten av modellen er gyldige.



Figur 3-13 Viser nedbørsfeltet som er satt sammen av flere REGINE enheter. De svarte pilene angir at det ikke strømmer vann over modellens grenser – no flow betingelser.

### 3.7.6 Bøelva

Bøelva er en stor elv som renner ut av Seljordsvannet. Denne elva ligger tett inntil brønnene til Bø vannverk, og vil sannsynligvis bidra med vann til brønnene. Bøelva ble modellert med konstante verdier for hydraulisk potensiale, som følger topografien langs elvestrengen. Et alternativ kan være å modellere elva ved å angi kilder/sluk langs elvestrengen, der vannfluksen er et resultat av differansen mellom elvas overflate og høyden på grunnvannspeilet (se kapittel 5.22 ).

### 3.7.7 Avrenning og infiltrasjon

Avrenning i modellen varierer romlig (se figur 3-4). Det er viktig å angi hvor mye av avrenningen som infiltrerer. Modellen skiller her mellom bart fjell og løsmasser.

Andelen av avrenningen som infiltrerer angis med en koeffisient  $\alpha$  som kan variere mellom 0 og 1.  $\alpha = 1$  betyr at 100 prosent av avrenningen infiltrerer,  $\alpha = 0$  betyr 0 prosent infiltrasjon.

Tabell 3.5 Eksempel på vektning av avrenning for bart fjell og løsmasser.

$\alpha_{\text{bart\_fjell}}$	0,15
$\alpha_{\text{løsmasser}}$	1

### 3.7.8 Brønn

Brønnene til vannverket modelleres som et sluk og pumperaten er satt til  $0,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{år}$ .

### 3.7.9 Parametre

I modellen skilles det kun mellom transmissiviteten til bart fjell og løsmasser. Transmissiviteten i bart fjell angis som en konstant, mens transmissiviteten i løsmasser angis som den hydrauliske ledningsevnen - K - multiplisert med mektigheten til løsmassene (se tabell 3.6). Dette gjør modellen til en 2-dimensjonal dybdeintegrert modell.

Tabell 3.6 Grensebetingelser og parametre i endelig modell

	Transmissivitet	Porøsitet	Longitudinal dispersivitet	Pumperate
Bart fjell	$8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	0,3	5 m	$0,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{år}$
Løsmasser	$1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} *$ løsmassenes mektighet (m)	0,3	5 m	$0,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{år}$

### 3.7.10 Transportlikningen

Transportlikningen blir løst i en tidsavhengig studie med 30 tidstrinn på 1 år, totalt 30 år.

Hastighetsfeltet fra Darcy's lov brukes i adveksjonsdelen av transportlikningen. I COMSOL angis det en diffusjons koeffisient ( $D_c$ ), men denne er egentlig den totale dispersjonskoeffisienten ( $D_L$ ). Dette blir tydelig hvis man ser på den faktiske likningen som løses i COMSOL.

Dispersjonskoeffisient i endelig modell:

$$D_L = \alpha_L * dl.U/n_e$$

- $\alpha_L$  er longitudinal dispersivitet, satt til 5 m i modellen
- $dl.U$  er hastighetsfeltet til modellen, dette varierer romlig
- $n_e$  er effektiv porøsitet, satt til 0,3

Konsentrasjonen av klorid i brønnen består av summen av klorid i veisalt og bakgrunnsverdier i grunnvannet fra nedbør. Kloridkonsentrasjon i ellevannet i Bøelva er ikke lagt inn i modellen.

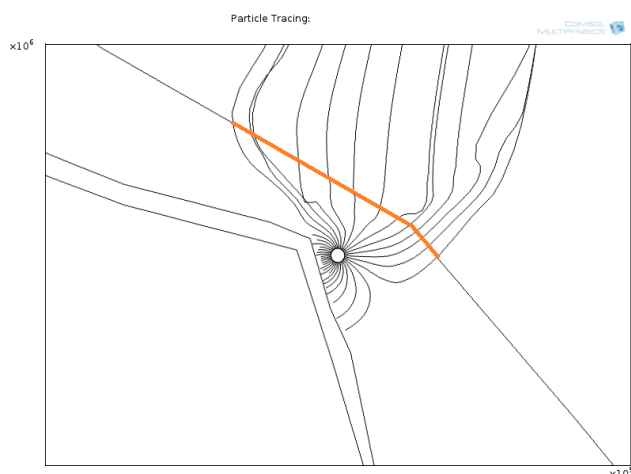
### 3.7.11 Usikkerhet

Det vil være usikkerhet forbundet med grensebetingelsene og parametrene i modellen. I tillegg vil de numeriske utregningene være forbundet med usikkerhet på grunn av numerisk dispersjon (se kapittel 3.9). En kvantifisering av usikkerheten til modellen er viktig da usikkerheten gir et bilde av hvor mye man kan stole på modellens resultater.

## 3.8 Massebalansemetoden

### 3.8.1 Innledning

Metoden er en alternativ metode til COMSOL's numeriske løsning av transportligningen. I denne metoden blir numerisk dispersjon eliminert ved kun å benytte det advective hastighetsfeltet. Kloridkonsentrasjonen blir regnet ut fra massebalansen mellom saltmengden på veien og pumperaten til brønn. Saltmengden på veien blir utledet fra brønnens nedslagsfelt (se figur 3-14). Metoden blir i oppgaven kalt massebalansemetoden.



*Figur 3-14 Viser brønnens nedslagsfelt. Den delen av veien som brønnen trekker salt fra er markert med rødt. Infiltrasjon:  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,05$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ . Vannet i brønnen består av 1/3 fra Bøelva og 2/3 fra nedbørsfeltet.*

Massebalansemetoden sikrer stasjonære forhold. Dette følger av at det er det stasjonære hastighetsfeltet i modellen, som ligger til grunn for metoden. Det vil si at kloridet fra veisaltet har blitt transportert til brønnen, og at konsentrasjonen av klorid i brønnen er stabilt.

Utrekning av klorid konsentrasjon ved massebalansemetoden vil ikke ha problemer med numerisk dispersjon, men forhold som dispersjon og diffusjon vil også være ignorert. Hoveddelen av transporten skjer ved adveksjon når vannet ikke er stillestående. Dette betyr at feilene som oppstår ved å ignorere dispersjon og diffusjon sannsynligvis er minimale.

### 3.8.2 Fremgangsmåte utregning klorid konsentrasjon ved massebalanse metoden

- 1) Finner lengde  $L$  [m] vei som brønnen trekker salt fra (se fig 3.14). Dette er et resultat av COMSOL's løsning av Darcy's lov – hastighetsfeltet.
- 2) Finner hvor mye veisalt  $M$  [mol/år] som blir lagt på denne veistrekningen (se vedlegg C-8).
- 3)  $Q$  er lik pumperate fra brønn [ $\text{m}^3/\text{år}$ ]



- 4)  $M/Q$  gir konsentrasjonen  $C$  [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ] av salt i brønnen
- 5)  $(C * \text{molvekt Cl})$  gir  $\text{Cl}$  i  $\text{g}/\text{m}^3$  som er det samme som  $\text{Cl}$  i  $\text{mg}/\text{l}$ .

### 3.8.3 Eksempel utregning

Ved en infiltrasjon på  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,05$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$  blir lengden av veien som det trekkes salt fra 733 meter (måles i COMSOL ved å se hvor brønnens nedslagsfelt krysser veien).

- 1)  $L = 733 \text{ m}$
- 2)  $M = 324273.5 \text{ mol}/\text{år}$
- 3)  $Q = 0,8 * 10^6 \text{ m}^3/\text{år}$
- 4)  $M/Q = 0,4 \text{ mol}/\text{m}^3$
- 5)  $C = 0,4 \text{ mol}/\text{m}^3 * (35.3 \text{ g}/\text{mol}) = 14 \text{ mg}/\text{l}$  klorid

Den største usikkerheten knytter seg til måling av lengden på veien i COMSOL. Det er vanskelig å få det helt nøyaktig. En usikkerhet på  $\pm 100 \text{ m}$  på veilengden vil dekke mulig feil med god margin.

Denne usikkerheten i veilengde gir en usikkerhet på konsentrasjon av klorid på  $\pm 2 \text{ mg}/\text{l}$  (se tabell 3.7).

Tabell 3.7 Lengden av veien som er påvirket av brønnens nedslagsfelt og kloridkonsentrasjon i brønnen regnet ut med massebalansemetoden ved forskjellige infiltrasjonsscenarioer.

Meter vei som brønnen trekker salt fra	Klorid mg/l massebalansemetoden
633 m	12 mg/l
733 m	14 mg/l
833 m	16 mg/l

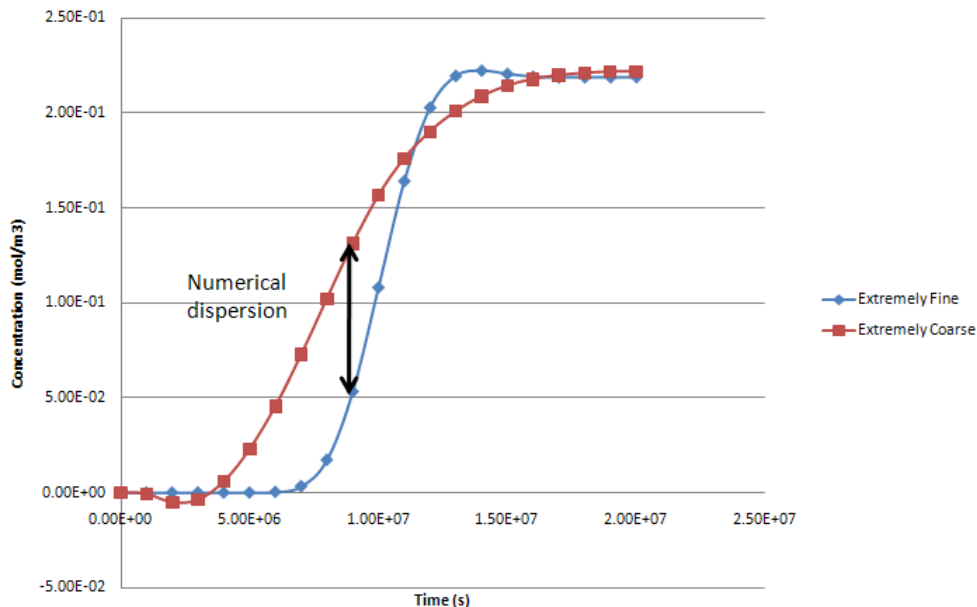
### 3.9 Numerisk dispersjon

Numerisk dispersjon er en mulig feilkilde i numeriske modeller (Appelo & Postma 2005).

Modellen regner ut verdier (f.eks hydraulisk potensiale eller saltkonsentrasjon) i et punkt i hvert gridelement. Alle andre steder er verdiene interpolerte estimater (Haitjema 1995). Dette kan føre til unøyaktigheter som kalles numerisk dispersjon.

Dette kan gi utslag som at det kommer salt inn fra utsiden av en brønns nedslagsfelt, noe som gir feil resultat. Grov oppløsning på gridet gir mer numerisk dispersjon enn en fin oppløsning. Under i figur 3-15 vises forskjellig gjennombruddskurve for salt langs en linje. Differansen mellom

gjennombruddskurvene skyldes forskjellig grad av numerisk dispersjon på grunn av forskjellig oppløsning på gridet i modellen.



Figur 3-15 Viser to gjennombruddskurver for henholdsvis "extremely fine mesh" og "extremely coarse mesh" i COMSOL (Cadran & Salva 2011). Differansen mellom kurvene skyldes numerisk dispersjon.

En høy oppløsning på gridet gir lang kjøretid for datamaskinen som løser modellen. Et kompromiss mellom kjøretid og nøyaktighet er derfor nødvendig. Et kriterium for å minimere numerisk dispersjon er at:

$$\Delta x \leq 2\alpha L \text{ (Kitterød 2011)}$$

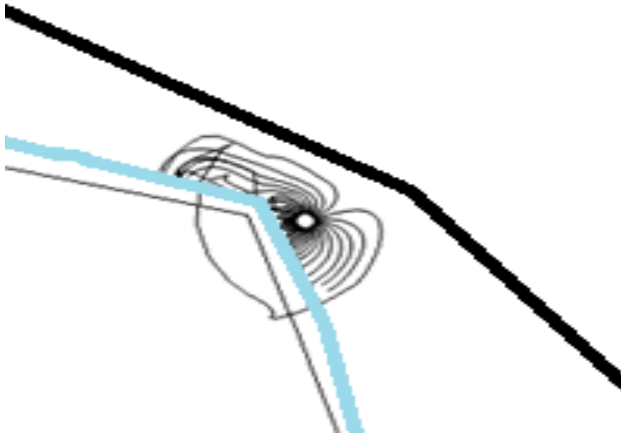
- $\Delta x$  er størrelsen på gridcellene i modellen [L]
- $\alpha L$  er longitudinal dispersivitet [L] (se kapittel 2.4.3).

I modellen er  $\alpha L = 5$  m. Dette betyr at størrelsen på gridcellene må være mindre enn  $2 \cdot 5 \text{ m} = 10 \text{ m}$ . I modellen har de kritiske områdene rundt brønn og elv en  $\Delta x$  på 0,3 m. Dette skulle da sikre at numerisk dispersjon ikke er et problem i modellen. Modellen ble allikevel testet for numerisk dispersjon.

### 3.9.1 Test numerisk dispersjon

Infiltrasjonen fra avrenning settes lik 0 i modellen. Dermed må brønnen trekke alt vannet fra elva. Dette fører til at nedslagsfeltet til brønnen ikke tangerer veien (se figur 3-16). Dette betyr at kloridkonsentrasjon i brønnen skal være lik bakgrunnskonsentrasjon av klorid i grunnvannet (det er

ikke lagt inn kloridverdier for ellevannet i Bøelva i modellen). Bakgrunnskonsentrasjon av klorid i grunnvannet i brønnen er 1.02 mg/l.



Figur 3-16 Viser nedslagsfeltet til brønnen når infiltrasjonen fra avrenning settes lik 0. Alt vannet trekkes fra elva (markert med tykk blå linje) og strømningslinjene tangerer ikke veien (markert med tykk svart linje).

### 3.9.2 Resultat av test numerisk dispersjon

Tabell 3.8 viser at kloridkonsentrasjonen i brønnen er høyere enn bakgrunnsverdien. Dette tyder på numerisk dispersjon.

Tabell 3.8 Kloridkonsentrasjon i brønnen regnet ut med COMSOL og bakgrunnsverdien for klorid i brønnen

Klorid konsentrasjon COMSOL	Bakgrunnsverdi klorid konsentrasjon
2.2 mg/l	1.02mg/l

### 3.9.3 Omfang numerisk dispersjon

For å få et bilde av omfanget på den numeriske dispersjonen sammenlignes resultater fra COMSOL med massebalanse metoden. Det er regneeksemplet i massebalansemetodeavsnittet, som ligger til grunn for sammenligningen (se kapittel 3.8.2).

Løsning av transportlikningen i COMSOL ga en kloridkonsentrasjon i brønnvannet på 29.4 mg/l. Denne verdien er 1.9 ganger så stor som kloridkonsentrasjonen funnet ved massebalansemetoden på 14 mg/l (se tabell 3.9). Dette kan tyde på at det blir for høye klorid verdier på grunn av problemer med numerisk dispersjon. Modellen ser ut til å trekke salt fra området utenfor brønnens nedslagsfelt.

Tabell 3.9 Konsentrasjonen av klorid i brønnen fra transportlikningen løst numerisk av COMSOL (tidsspenn 30 år) og konsentrasjon av klorid i brønnen regnet ut ved massebalansemetoden.

$\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,05$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ .

Klorid mg/l numerisk COMSOL	Klorid mg/l massebalansemetoden
29.4 mg/l klorid	14 mg/l

### 3.9.4 Konklusjon numerisk dispersjon

Det er tydelig at numerisk dispersjon er til stede i modellen. Gridet som blir brukt i modellen er COMSOL's "extremely fine mesh". Ytterligere forfining ble prøvd, men ga uholdbar lang kjøretid. Resultatene for kloridkonsentrasjonen i brønnen blir derfor regnet ut både ved transportlikningen i COMSOL og ved massebalansemetoden (se tabell 4.2).

## 4 RESULTAT

### 4.1 Vannmengde til brønn fra Bøelva

Mengden vann som brønnen trekker fra Bøelva er et viktig punkt. Vannet fra Bøelva har et lavt innhold av klorid (se tabell 3.3), og vil ha en uttynningseffekt. Hvor mye vann som modellen trekker fra Bøelva, er et direkte resultat av hvor mye av avrenningen som infiltrerer modellen. Lite vann i modellen fra avrenning, betyr at brønnen trekker mer vann fra elva. Tabell 4.1 viser hvor mye vann som trekkes fra elva ved forskjellige infiltrasjonsscenarioer. For at 65 prosent av vannet i brønnen skal komme fra elva, må infiltrasjonen av avrenning over bart fjell være nede i 5 prosent. Ved 1 prosent infiltrasjon i bart fjell trekkes alt vannet fra elva. Graden av infiltrasjon over områdene med løsmasser har liten effekt på hvor mye vann brønnen trekker fra Bøelva.

Tabell 4.1 Viser vannvolumet som brønnen trekker fra Bøelva ( $m^3/\text{år}$ ).  $\alpha_{\text{bart\_fjell}}$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}}$  angir hvor mye av avrenningen over henholdsvis bart fjell og løsmasser som infiltrerer grunnen (1 = 100 prosent, 0 = 0 prosent).

$\alpha_{\text{bart\_fjell}}$	$\alpha_{\text{løsmasser}}$	Vann fra Bøelva ( $m^3/\text{år}$ )	Vann fra Bøelva i forhold til brønnens pumperate i prosent
1	1	0	0
0,5	1	0	0
0,25	1	$6 \cdot 10^4$	8
0,15	1	$2,6 \cdot 10^5$	33
0,05	1	$5,2 \cdot 10^5$	65
0,01	1	$8 \cdot 10^5$	100
0,15	0,5	$2,8 \cdot 10^5$	35
0,15	0	$3,0 \cdot 10^5$	38

### 4.2 Kloridkonsentrasjon i brønn ved forskjellige infiltrasjonsscenarioer

Modellen ble kjørt med forskjellige infiltrasjonsscenarioer. Dette gir et bilde av hvordan klorid konsentrasjonen i brønn varierer med vannmengden i modellen. Kloridkonsentrasjonen i brønn ble regnet ut ved massebalansemetoden (se kapittel 3.8) og ved å løse transportlikningen numerisk i COMSOL. Massebalansemetoden ble brukt fordi det er påvist numerisk dispersjon i modellen, ved bruk av transportlikningen i COMSOL (se kapittel 3.9). Massebalansemetoden har eliminert numerisk dispersjon. Usikkerheten til massebalansemetoden er estimert til  $\pm 2$  mg/l.

Tabell 4.2 viser resultatene.

Tabell 4.2 Viser kloridkonsentrasjon i brønn ved løsning av transportlikningen i COMSOL over et tidsspenn på 30 år og ved massebalansemetoden.  $\alpha_{\text{bart\_fjell}}$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}}$  angir hvor mye av avrenningen over henholdsvis bart fjell og løsmasser som infiltrerer grunnen (1 =100 prosent, 0 = 0 prosent).

$\alpha_{\text{bart\_fjell}}$	$\alpha_{\text{løsmasser}}$	Cl COMSOL(mg/l)	Cl massebalanse(mg/l)
1	1	5,2	4
0,5	1	7,0	5
0,25	1	10,6	5
0,15	1	15,1	6
0,05	1	29,4	14
0,15	0,5	15,4	7
0,15	0	15,7	7

### 4.3 Dispersjonens påvirkning på kloridkonsentrasjon i brønn

Dispersjon er en faktor i transportlikningen. For å finne ut i hvilken grad dispersjonen påvirker kloridkonsentrasjon, ble scenarioer med forskjellig dispersjon løst i COMSOL. Dispersjonen er summen av den longitudinale dispersiviteten ( $\alpha_L$ ) og porevannshastigheten. Tabell 4.3 viser resultatene.

Tabell 4.3 Kloridkonsentrasjon (mg/l) i brønnen funnet ved å løse transportlikningen i COMSOL ved ulik dispersjon.  $v$  = porevannshastigheten. Porevannshastigheten varierer romlig. Infiltrasjon i modellen er  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ .

Dispersjon	Kloridkonsentrasjon (mg/l)
10 m * v	15,4
5 m * v	15,1
1 m * v	15,7

## 5 DISKUSJON

### 5.1 Valg modell

I modellering forenkles virkeligheten. En god modell legger vekt på de forhold som er viktige og minimerer usikkerheten. Stasjonær strømming er første steg i all modellering. I denne oppgaven er derfor stasjonære strømningsforhold hovedfokus. Det er lagt vekt på å dokumentere effekten av usikkerhet i grensebetingelsene. En stor usikkerhet når det gjelder simulering av kloridkonsentrasjon i brønn er vannmengden som infiltrerer akviferen. Det er vanskelig å estimere i hvilken grad vannet infiltrerer grunnen.

### 5.2 Nedbørsfelt

Nedbørsfeltet i modellen er basert på topografi ut fra NVE sitt REGINE register over nedbørsfelt. REGINE deler inn Norge i relativt store nedbørsfelt. I dette tilfellet øker det sannsynligheten for at det er no-flow grensebetingelsene langs yttergrensene til modellen. Dette er viktig, fordi nedbørsfeltet til modellen må være stort nok til at brønnens nedslagsfelt ikke påvirker modellens yttergrenser. Nedbørsfeltet i modellen består av tre nedbørsfelt fra REGINE (se figur 5-1). Nedbørsfeltene 016.ZB1Z og 016.CA5 ligger på samme side av elva som brønnen, og kan bidra med vann. Nedbørsfeltet 016.CA6 bidrar ikke med vann, da det ligger på andre siden av elva. Nedbørsfeltet 016.ZB1Z ligger i høyfjellet og mottar mye nedbør. Dette nedbørsfeltet blir drenert av elva Bjønndøla, som renner ut i Seljordsvannet. Elva Bjønndøla krysser over akviferen til Bø vannverk, og kan bidra med vann til akviferen. Bjønndøla er ikke lagt inn i modellen som et eget elveelement.



Figur 5-1 Viser nedbørsfeltene som er brukt i modellen. Pilen peker på Bø vannverk. Kilde: <http://atlas.nve.no>.

Hvis en mindre modell skulle blitt benyttet (f.eks for å minimere numerisk dispersjon), måtte det blitt angitt fluks av vannmengder over modellens yttergrenser. En hovedregel er at konstant hydraulisk potensiale ikke benyttes oppstrøms. I stedet benyttes en grensebetingelse der det er vannfluksen som er konstant. Dette krever at volumet av vann som tilføres modellen utenfra kvantifiseres. Dette kan gjøres i COMSOL, ved å integrere opp vannmengden over en linje (se vedlegg A-16).

### 5.3 Avrenning

Vannmengden som infiltrerer grunnen er en veldig viktig grensebetingelse, da mengden vann vil bestemme hvor mye veisaltet tynnes ut. Det er usikkerhet i datagrunnlaget fra NVE, men det er også en usikkerhet i forhold til hvor mye av avrenningen som infiltrerer grunnen. Hvor mye vann som infiltrerer grunnen bestemmes ut fra mengde og type løsmasser, i tillegg til omfanget av sprekkesystemer i fjell. Vann som transporteres som overflateavrenning i bekker og elver kan også infiltrere grunnen på et senere tidspunkt. Dette er spesielt aktuelt der elver krysser akviferen, eller ved oppsamling av vann i tjern og vann på akviferen. Hvis grunnvannspeilet ligger dypere enn elva eller tjernet, og disse har permeable sedimenter i bunnen, vil de kunne være en vannkilde for akviferen. Det er allikevel naturlig at en mindre del av avrenningen infiltrerer i fjellområdene enn over selve akviferen. Dette er på grunn av lite løsmasser i fjellet. De store fjellområdene har allikevel



så mye mer avrenning enn de lavereliggende områdene, at mengden vann som infiltrerer modellen fra fjellområdene har stor effekt på kloridkonsentrasjon i brønnen.

#### 5.4 Vannbalansen i modellen

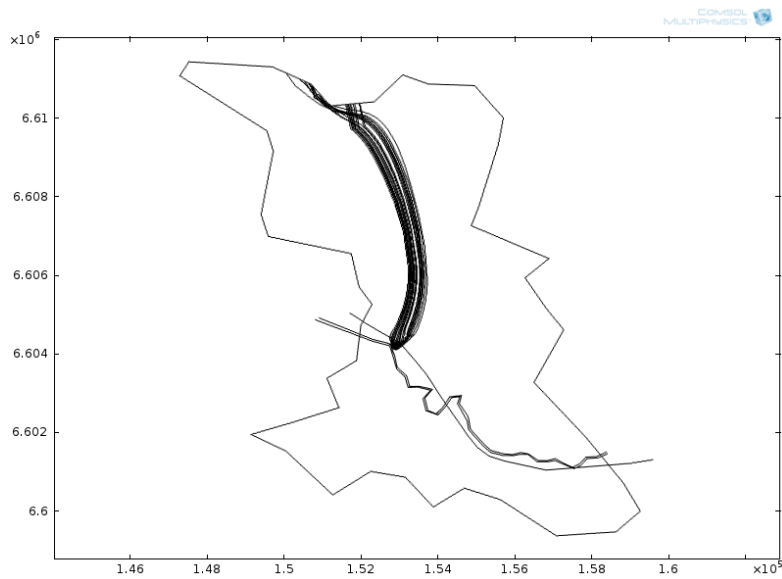
I tillegg til numerisk dispersjon kan det oppstå unøyaktigheter rundt massebalansen i numeriske modeller (Haitjema 1995). Graden av unøyaktighet kan testes, ved å sammenligne hvor mye vann som kommer inn i modellen med hvor mye vann som kommer ut. Ved å la all avrenningen infiltrere modellen ( $\alpha_{\text{bart\_fjell}}=1$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}}=1$ ) blir vannmengden som infiltrerer modellen  $3,0 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{år}$ . Ved å integrere opp mengden vann som kommer ut av modellen (summen av vannet inn i Bøelva fra nedbørsfeltet (se vedlegg A-16) og brønnens pumperate) blir vannmengden ut av modellen  $2,8 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{år}$ . Dette betyr at 93 prosent av vannet som går inn kommer ut. Dette resultatet burde vært nærmere 100 %. Det er mulig å endre på parametre i COMSOL for å forbedre vannbalansen i modellen. Det har ikke blitt gjort i denne oppgaven, men kan være et behov i fremtidige modeller.

#### 5.5 Brønnens nedslagsfelt

Cadran & Salva (2011) viste ved beregninger i COMSOL at vannvolumet som infiltrerer modellen bør være minst 10 ganger større enn vannvolumet som brønnen pumper ut av akviferen. Dette ville sikre at strømningslinjer i modellens yttergrenser ikke blir påvirket av brønnen.

Pumperaten til brønnen i modellen er  $0,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{år}$ . Vannmengden som infiltrerer nedbørsfeltet i modellen ved  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$  er 4.5 millioner  $\text{m}^3/\text{år}$  (se vedlegg C-5). Dette er kun 5,6 ganger så mye som pumperaten til brønnen. 1/3 av vannet til brønn trekkes fra Bøelva (se tabell 4.1).

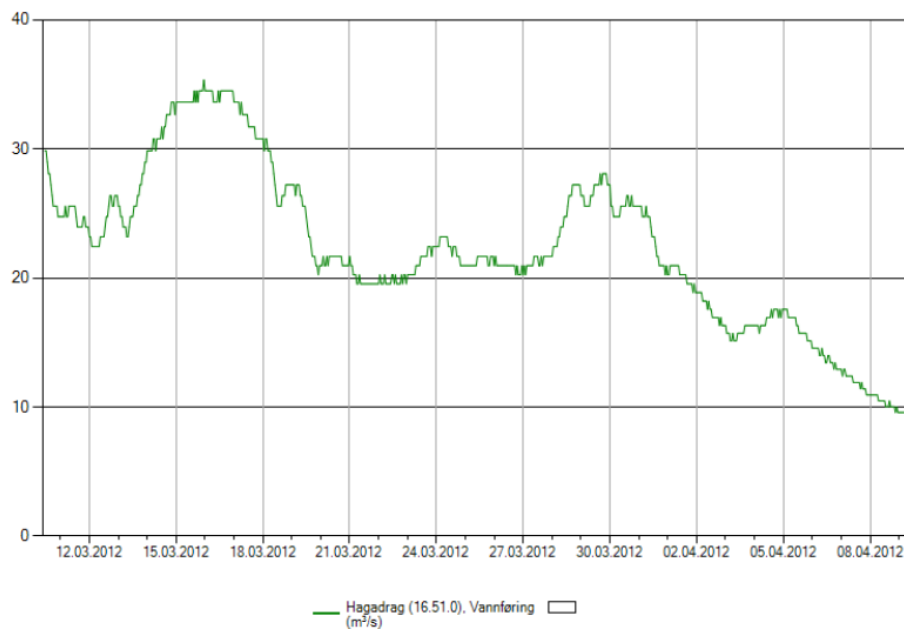
Det er mulig at brønnen i realiteten trekker vann fra andre siden av elva, og at nedbørsfeltet derfor er større enn angitt i modellen. Det er glasifluviale løsmasser på andre siden av Bøelva som kan bidra med vann (se figur 3-2). Å modellere Bøelva slik at andre siden av Bøelva kan bidra med vann til brønn kan være et forbedringspotensial for modellen (se kapittel 5.22).



Figur 5-2 Viser brønnens nedslagsfelt. Infiltrasjon:  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ . 1/3 av vannet til brønn trekkes fra Bøelva ved dette infiltrasjonsscenarioet.

## 5.6 Vannføring i Bøelva

Laveste vannføring i Bøelva i perioden 12.03.12 til 08.04.12 var ca  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (se figur 5-3).



Figur 5-3 Vannføring i Bøelva ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ved Hagadrag målestasjon for perioden 12.03.12 – 08.04.12. Y-aksen viser vannføring og X-aksen måletidspunktet. Kilde: NVE.

Dette gir en avrenning i løpet av et år på 315.4 mill m<sup>3</sup>/år. Ved tørke i løpet av sommeren eller ved lange vintre kan vannføringen gå mer ned. Ved en vannføring på 1 m<sup>3</sup>/s blir vannføringen i løpet av et år ca 31,5 mill m<sup>3</sup>/år.

Brønnene til Bø vannverk trekker ca 0,8 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/år. Dette er 2,5 prosent av 31,5 mill m<sup>3</sup>/år. Det er altså mer enn nok vann i Bøelva til å dekke brønnens behov selv ved lav vannføring.

### 5.7 Bøelva i modellen

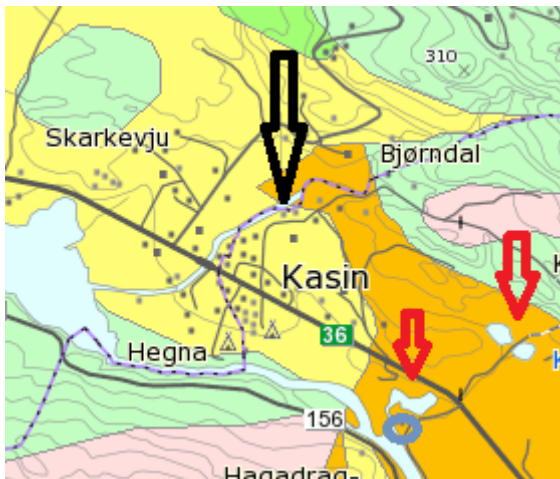
Bøelva er modellert med konstant hydraulisk potensiale langs elvestrengen og deler i realiteten modellen i to. Konstant hydraulisk potensiale langs elva betyr at den er en uendelig kilde til vann. De store vannmengdene som går i Bøelva (se kapittel 5.6) gjør at denne forutsetningen er ganske god. Dette forutsetter at elvebunnen er permeabel. Da elva deler modellen i to bidrar kun elva og nedbørsfeltet på brønnens side av elva med vann. Den andre siden av elva er avstengt fra å bidra med vann. Dette kan være riktig, men figur 3-2 viser at det er løsmasser på andre siden av elva litt nedstrøms brønnen. Disse kan bidra med vann til brønnen, spesielt hvis elvebunnen er lite permeabel. Elvebunnen kan tenkes å bestå av tettere sedimenter med en lav permeabilitet. Dette er det ikke tatt høyde for i modellen. Permeabiliteten i elvebunnen er ikke kjent.

Hadde vannmengden som elva avgir til brønn vært kjent, kunne modellen blitt kalibrert mot denne verdien i tillegg til kloridkonsentrasjonen i brønnen. Kalibrering av modellen mot vannmengde fra elva, vil gi en god hjelp i å få riktig vannmengde i modellen.

Vannkjemianalyser kan være til hjelp for å finne hvor stor del av brønnvannet som kommer fra elv. Helgestad et al. (2005) sammenlignet alkaliniteten i brønnvann med alkaliniteten i grunnvann og elvevann, for å finne andelen av elvevann i brønnvannet. Dette er kun aktuelt der en elv antas å bidra med vann til brønn.

### 5.8 Infiltrasjon av avrenning til grunnen

Figur 5-4 viser med svart pil der elva Bjønndøla går over akviferen. I dette området er det sannsynlig at akviferen kan få tilførsel av vann fra Bjønndøla. Dette kan forekomme hvis elvebunnen er permeabel, og grunnvannspeilet ligger under elva. I hvilken grad dette skjer er ikke kjent. Vannmålinger i Bjønndøla kunne ha blitt brukt til å estimere i hvilken grad avrenningen i fjellområdene infiltrerer grunnen, ved å sammenligne vannmålingene med total avrenning i nedbørsfeltet. Slike vannmålinger var ikke tilgjengelig i dette prosjektet.



Figur 5-4 Elva Bjørndøla (svart pil) krysser akviferen til Bø vannverk. Røde piler angir tjern lokalisert i akviferen. Brønnen vises med blå ring. Kilde: NGU

De røde pilene i figur 5-4 angir tjern som er lokalisert på akviferen. Disse tjernene samler opp vann fra nedbørsfeltet og kan fungere som kilde for akviferen. Dette viser at vann fra fjellområdene med mye avrenning samles opp og kan infiltrere akviferen nedstrøms. Vann som infiltrerer via de to tjernene, samt vann som infiltrerer via Bjørndøla, er modellert som infiltrasjon fra fjellområdene via vektning av den totale avrenningen over bart fjell -  $\alpha_{\text{bart\_fjell}}$ .

## 5.9 Topografi

Dataene for topografien i nedbørsfeltet er laget med GIS verktøy. Oppløsningen i rutenettet er på 50\*50 m. I hver rute er det beregnet et gjennomsnitt for høyden over havet. COMSOL interpolerer topografien til en kontinuerlig flate ut fra verdiene i rutenettet. Dette skulle være tilstrekkelig, men kan være et problem langs Bøelva. Topografien ved Bøelva brukes som utgangspunkt for å angi konstant hydraulisk potensiale langs elvestrekningen. Lokale variasjoner i terrenget ga noen unøyaktige verdier, så MATLAB ble brukt til å glatte ut topografien langs elva. Dette skulle uansett ikke resultere i betydelige feil i modellen.

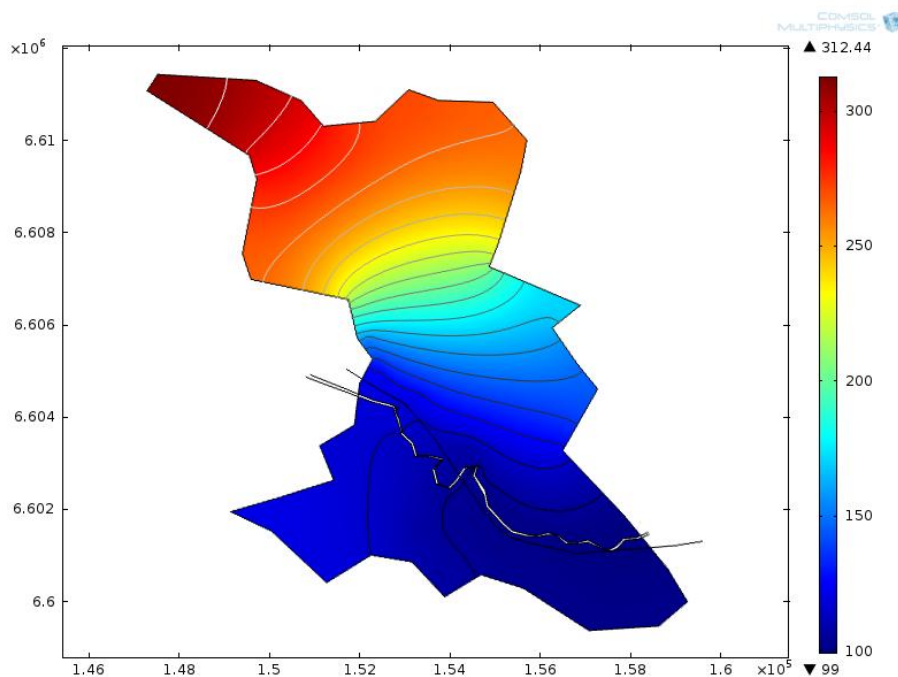
## 5.10 Løsmasser

Dataene med løsmassenes mektighet vil ha en iboende usikkerhet (se kapittel 3.6.3). Løsmassene antas å være isotropiske. Det vil si at det ikke er noen egenskaper som er retningsavhengige. Dette er en forenkling. Bester (2006) fant at heterogenitet i en akvifer kan føre til heterogen fordeling av kloridet i akviferen, også i dybden.

Å innføre slike detaljer i modellen er utenfor oppgavens rammer. Det ville kreve et stort kartleggingsarbeid, og betydelig mer datamaskinressurser enn tilgjengelig.

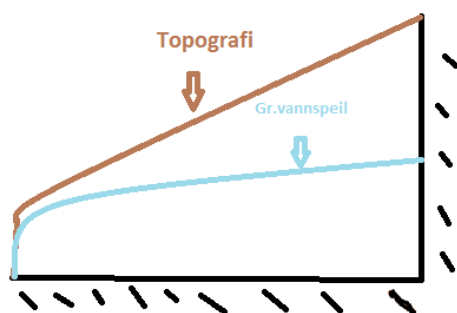
### 5.11 Hydraulisk ledningsevne/Transmissivitet

Den hydrauliske ledningsevnen multipliseres med mektigheten på løsmassene. Dermed er det transmissiviteten som angis i modellen. Transmissiviteten [ $L^2/T$ ] er et mål på modellens evne til å transportere vann. Transmissiviteten måtte settes kunstig høyt i områdene med bart fjell. Grunnen til dette er at COMSOL ikke konvergente til en løsning når transmissiviteten ble satt lavere. Dette førte til at verdiene for hydraulisk potensiale ble kunstig lave i fjellområdene. Figur 5-5 viser hydraulisk potensiale i modellen ved en infiltrasjon på  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ . Verdiene for hydraulisk potensiale i fjellområdene er betydelig lavere enn topografien skulle tilsi. I Norge er det naturlig at grunnvannspeilet følger overflaten til topografien, da løsmassene er skrinne og forholdsvis tette. Verdiene for hydraulisk potensiale i de lavere områdene, nærme elva og brønnen, følger topografien i større grad. Dette er naturlig, da det er satt konstante verdier for hydraulisk potensiale langs elven, basert på topografien.



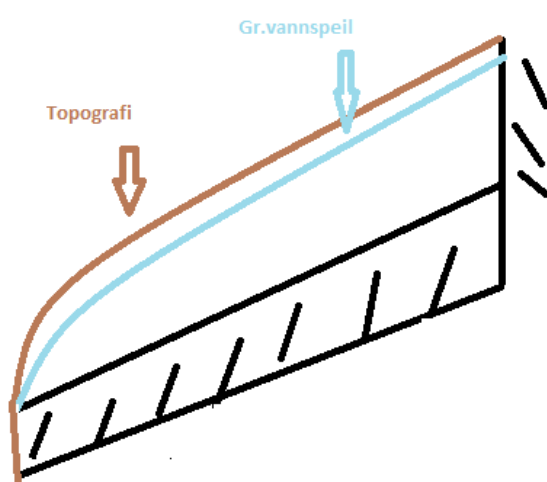
*Figur 5-5 Viser verdier for hydraulisk potensiale med infiltrasjon  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ . Gradienten er betydelig mindre enn gradienten på topografien i området.*

Et forhold som gjør at grunnvannspeilet i realiteten trolig følger topografien i dette fjellområdet, er at det er forholdsvis mye avrenning i de høyereliggende områdene. I tillegg vil den hydrauliske konduktiviteten sannsynligvis avta nedover i fjellet på grunn av økende trykk fra fjellmassene. Dette kan føre til at vannførende sprekker ikke går veldig dypt. I modellen er derimot hele berggrunnen vannførende. Dette kan bidra til at grunnvannspeilet blir for lavt i de høyereliggende områdene i modellen (se figur 5-6).



*Figur 5-6 Viser hvordan grunnvannspeilet i blått ikke følger topografien i brunt. Berggrunnet er vannførende i hele dypet. De sorte strekene markerer bunnen av modellen.*

Hvis modellen hadde hatt en transmissivitet som var negativt korrelert med tykkelsen på berggrunnen, ville det gitt en simulering av at kun det øverste laget av berggrunnen er vannførende (se figur 5-7). Dette ville sannsynligvis ha ført til at grunnvannspeilet ble høyere og mer lik topografien. Dette kan være et forbedringspotensiale for modellen.



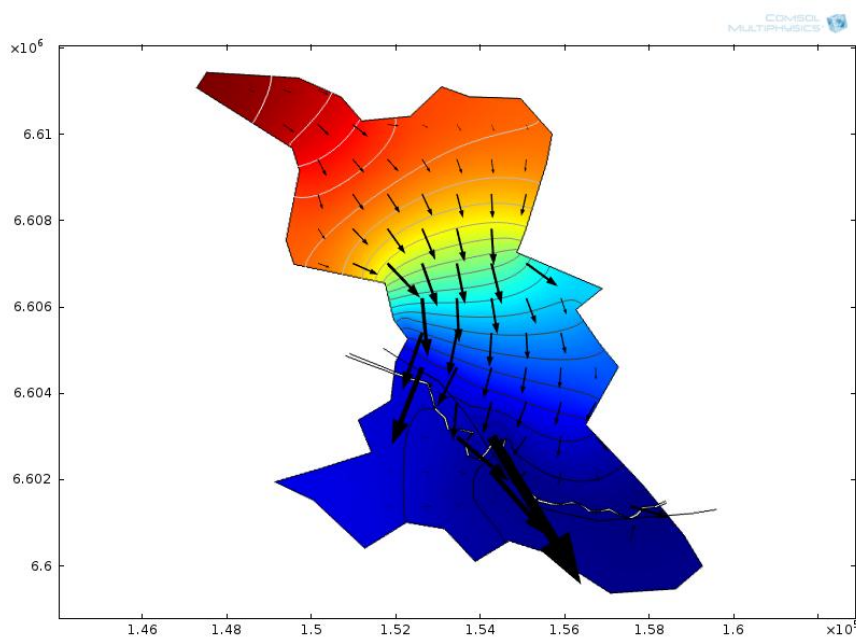
*Figur 5-7 Viser hvordan grunnvannspeilet sannsynligvis vil følge topografien i modellen hvis kun den øverste delen av berggrunnen var vannførende. Den hydrauliske konduktiviteten vil sannsynligvis avta ned i dypet på grunn av økende trykk fra fjellmassene. De sorte strekene markerer bunnen av modellen.*

Endring av transmissiviteten i modellen hadde ikke stor innvirkning på kloridkonsentrasjonen i brønnen. Det skal sies at modellen ikke tillot store endringer i transmissivitet på grunn av konvergeringsproblemer. I realiteten vil permeabiliteten og transmissiviteten i et område ha stor

innvirkning på hvor mye vann som vil infiltrere grunnen. Et område uten mye løsmasser og vannførende sprekker vil ha lite infiltrasjon og mye overflateavrenning.

### 5.12 Hastighetsfeltet

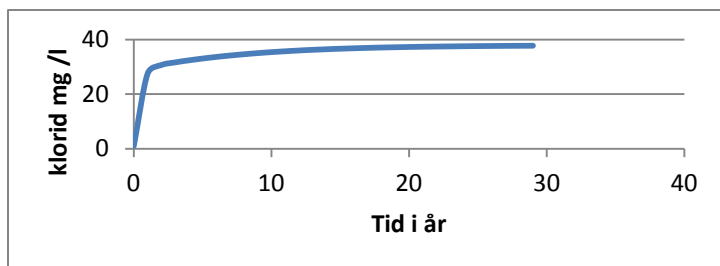
COMSOL finner hastighetsfeltet til grunnvannet ved å løse Darcy's lov numerisk. Det ble valgt en stasjonær strømningsmodell. En robust stasjonær modell er nødvendig før tidsvariasjoner modelleres. Figur 5-8 viser et potensielt hastighetsfelt for modellen. Hastighetsfeltet er den gjennomsnittlige hastigheten for vannet, også kalt Darcy hastigheten (se likning (3)). Hastighetsfeltet blir bestemt av vannmengden i modellen.



*Figur 5-8 Hastighets feltet (darcy hastigheten) i modellen angis med sorte piler. Størrelsen på pilene angir hastighetsfeltet relative størrelse. Det er tydelig at vannet strømningsmønster følger topografien ned mot elva. Infiltrasjon:  $\alpha_{\text{bart fjell}} = 0,15$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$*

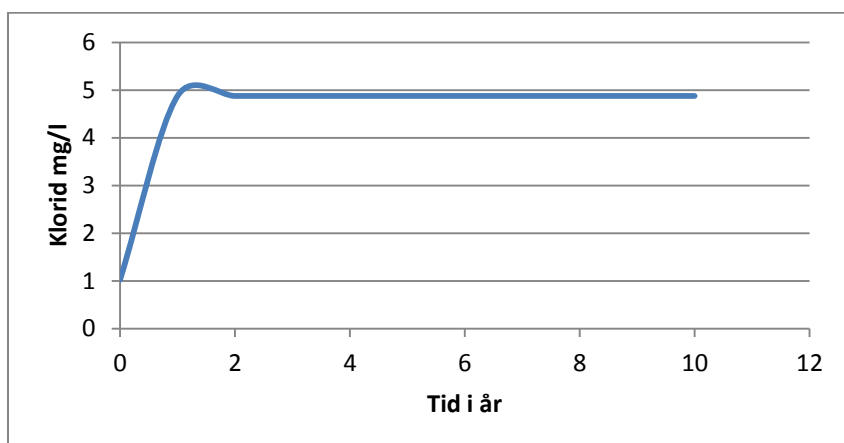
### 5.13 Transport av veisalt med stasjonære strømningshastigheter

Modellen skal finne den stasjonære kloridkonsentrasjonen. Det er viktig at kloridkonsentrasjonen i brønnen har nådd et stabilt nivå. Det er viktig å vite når stabile forhold oppnås, slik at COMSOL kan løse transportlikningen over et stort nok tidsrom. Figur 5-9 viser gjennombruddskurven for klorid i brønnen med 30 års simuleringstid. Det er tydelig at kloridkonsentrasjonen nærmer seg et stabilt nivå, da kurven flater ut.



Figur 5-9 Gjennombruddskurve for klorid (mg/l) i brønnen over et tidsspenn på 30 år. Modellen som er kjørt i dette eksemplet har en infiltrasjon på  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,15$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ . Maksimum kloridnivå er 37 mg/l.

Det er naturlig at tiden det tar å oppnå stabile forhold er avhengig av vannmengden. Ved å øke vannmengden som infiltrerer modellen, tar det kortere tid å oppnå stabile kloridkonsentrasjoner i brønnen. Figur 5-10 viser gjennombruddskurven etter 10 år når all avrenning infiltrerer modellen.



Figur 5-10 Gjennombruddskurve for klorid (mg/l) i brønnen over et tidsspenn på 10 år.  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 1$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ . Maksimum kloridnivå er 4,9 mg/l

Det er stor sannsynligheten for at en kjøretid på 30 år er nok for å oppnå stabile kloridkonsentrasjoner i brønn.

#### 5.14 Veisalt i modellen

I modellen forutsettes det at veisaltet infiltrerer grunnen jevnt over året. Ved å legge på salt jevnt over året, blir det ingen pulser med høye kloridkonsentrasjoner i brønnen. Bester (2002) fant at det er sannsynlig at transportmodeller med langt tidsperspektiv, kan ignorere sesongvariasjoner i forbindelse med saltpålegging. Det vil alltid være en del usikkerhet forbundet med dette. Veisaltet trenger ikke infiltrere grunnen når det blir lagt på om vinteren. Da er det sannsynligvis frost i bakken, og lite infiltrasjon forekommer. Det er også mulig at en del av saltet blir liggende på veien og i veikanten før det løses opp og infiltrerer grunnen. Tabell 3.1 viser at de observerte klorid nivåene i



brønnene varierer fra 4,1 mg/l til 25 mg/l. De høyeste konsentrasjonene er på høsten og vinteren, men det er variasjon. Det er vanskelig å avgjøre om de høyeste kloridkonsentrasjonene er forbundet med salting av veien samme vinter.

Det er stor usikkerhet rundt hvor mye av veisaltet som går tapt til grunnvannet. I denne oppgaven er salttapet fra vei til grunnvannet 100 prosent. Kristiansen et al. (2009) brukte en egen modell for salttap fra vei i kombinasjon med en modell for grunnvannstrømning. Salttapsmodellen opererte med et salttap fra vei til grunnvann på 15 prosent. Ved Bø vannverk finnes det et dreneringsrør langs riksveien som har til hensikt å drenere saltholdig vann forbi akviferen og ut i Bøelva. I hvilken grad dette dreneringsrøret har effekt er ikke kjent.

Modellen forutsetter også at saltet er jevnt fordelt i akviferen.

#### 5.15 Bakgrunnsverdier i grunnvann

Bakgrunnskonsentrasjon for klorid i grunnvannet ligger på lave verdier (1,02 mg/l i brønn) i forhold til den observerte kloridkonsentrasjonen som varierer mellom 4,1 og 25 mg/l. Dette tyder på at brønnen får tilført klorid fra veisaltet.

#### 5.16 Bakgrunnsverdier Bøelva

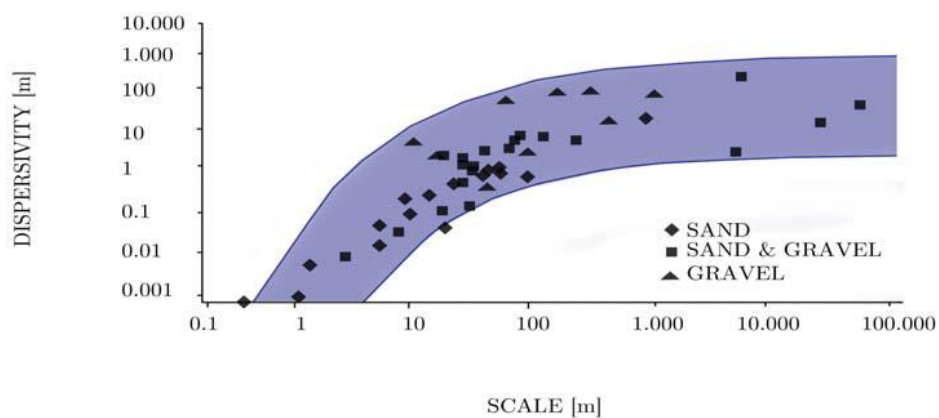
Kloridkonsentrasjoner i ellevannet i Bøelva er ikke tatt inn i modellen. I stedet er bakgrunnsverdiene for klorid i grunnvannet lagt til grunn også for vannet i Bøelva. I brønnen er denne bakgrunnsverdien for klorid på 1,02 mg/l. Tabell 3.3 viser to målinger av klorid i Bøelva i september 2012 på henholdsvis 1,74 mg/l og 1,37 mg/l. Altså noe høyere enn bakgrunnsverdiene for klorid i grunnvannet, men differansen er liten. Det er dermed høy sannsynlighet for at det er godt nok å bruke bakgrunnsverdiene for klorid i grunnvannet også for ellevannet i Bøelva.

#### 5.17 Porøsitet

Porøsiteten ( $\epsilon$ ) i modellen ble satt til 0,3. Porøsiteten vil innvirke på porevannshastigheten ( $v = q / \epsilon$ ). Dette betyr at porøsiteten vil ha innvirkning på hastigheten til salttransporten. Hvis det er oppnådd stabile klorid nivåer i brønnen vil derimot ikke porøsiteten spille så stor rolle. Derfor er det viktig at tidsspennet til modellering av salttransporten er langt nok til at stasjonære forhold er oppnådd i brønnen. Ved bruk av massebalansemetoden vil det være stasjonære forhold slik at porøsiteten ikke er viktig.

#### 5.18 Dispersivitet

I modellen ble det valgt en dispersivitet på 5 m. Figur 5-11 viser forhold mellom dispersivitet i ulike typer løsmasser og transportlengden.



Figur 5-11 Longitudinal dispersivitet ( $\alpha_L$ ) typiske for grunnvannsakviferer på Y-aksen. X-aksen viser transportlengden (Dagan 1989).

Tabell 4.3 viser at kloridkonsentrasjonen endrer seg lite ved forskjellige dispersjonskoeffisienter ( $D_L$ ) (se kapittel 2.4.3). Det tyder på at dispersivitetskoeffisienten ikke er så viktig i modellen. Ved bruk av massebalansemetoden spiller dispersjon ingen rolle.

### 5.19 Numerisk dispersjon

Konklusjonen fra kapittel 3.9.4 er at numerisk dispersjon er betydelig i modellen. Numerisk dispersjon er imidlertid eliminert når massebalansemetoden benyttes. Kloridkonsentrasjonene ble derfor regnet ut, både ved å løse transportlikningen numerisk og ved å benytte massebalansemetoden. Den største usikkerheten ved massebalansemetoden, er sannsynligvis målingen av lengden på veien som brønnen trekker veisalt fra. Usikkerheten ble beregnet til  $\pm 2$  mg/l klorid.

For å forebygge numerisk dispersjon kunne det blitt lagd en mindre modell, der yttergrensene på modellen ikke er no-flow grenser. I stedet måtte vannfluksen over grensene blitt angitt. En mindre modell ville krevd mindre datamaskinkapasitet og størrelsen på cellene i gridet kunne blitt gjort enda mindre.

## 5.20 Sensitivetsanalyse

Vannmengden som infiltrerer modellen påvirker kloridnivået i brønnen i stor grad. Det er stor usikkerhet rundt hvor mye av avrenningen som infiltrerer grunnen da det mangler data som kan gi informasjon om dette. Derfor er det viktig å finne ut hvor mye kloridnivået i brønnen varierer ved forskjellige infiltrasjonsscenarioer.

Forskjellige infiltrasjonsscenarioer ble simulert og kloridnivået i brønnen ble regnet ut ved å løse transportlikningen i COMSOL og ved massebalansemetoden (se tabell 4.2). Dette ble blant annet gjort for å kvantifisere usikkerheten vannmengden i modellen har på kloridnivået i brønn. I denne sensitivetsanalysen er det resultatene fra massebalansemetoden som er lagt til grunn.

Ved å sammenligne observert kloridverdi i brønn ( $C_{obs}$ ) og den simulerte kloridverdien ( $C_{sim}$ ) ved forskjellige infiltrasjonsscenarioer, estimeres differansen mellom observerte og simulerte verdier. Denne differansen kan minimaliseres, ved å endre  $\alpha_{bart\_fjell}$  og  $\alpha_{løsmasser}$  i modellen. Slik optimalisering er utenfor siktemålet i dette prosjektet.

Ved infiltrasjon på  $\alpha_{bart\_fjell} = 1$  og  $\alpha_{løsmasser} = 1$  gir massebalansemetoden en  $C_{sim} = 4$  mg/l. Ved en infiltrasjon på  $\alpha_{bart\_fjell} = 0,05$  og  $\alpha_{løsmasser} = 1$  prosent blir  $C_{sim} = 14$  mg/l. Konsentrasjonen varierer med 10 mg/l.

Endring i infiltrasjonen over løsmasser ga lite utslag på kloridkonsentrasjonen. Ved infiltrasjon på  $\alpha_{bart\_fjell} = 0,15$  og  $\alpha_{løsmasser} = 1$  gir massebalansemetoden en  $C_{sim} = 6$  mg/l. Ved en infiltrasjon på  $\alpha_{bart\_fjell} = 0,15$  og  $\alpha_{løsmasser} = 0$  er  $C_{sim} = 7$  mg/l.

Det kan da se ut som vannmengden som infiltrerer over bart fjell har 10 ganger større effekt på kloridkonsentrasjonen enn vannmengden infiltrert over løsmasser. Det betyr at infiltrasjonen over bart fjell inneholder den største usikkerheten.

## 5.21 Avvik mellom observert og simulert kloridnivå i brønnvannet

De observerte kloridkonsentrasjonene varierer mellom 4,1 mg/l og 25 mg/l (se tabell 3.1). De simulerte kloridkonsentrasjonene regnet ut med massebalansemetoden varierer mellom 4 mg/l og 14 mg/l (se tabell 4.2). De observerte maksimumsverdier er altså noe høyere enn de simulerte maksimumsverdiene.

Det kan være andre kilder til klorid enn veisalt i akviferen. Området ligger under marin grense og det kan være marin leire under de glasifluviale og fluviale massene som akviferen består av. Jordbruk i

området kan også være en kilde til klorid. Dette kan være noe av årsaken til at de observerte verdiene ligger noe høyere enn de simulerte.

Målinger av kloridkonsentrasjon i Bøelva ga et gjennomsnitt på 1,55 mg/l. Målingene i Bøelva ble foretatt i september 2012. Den simulerte bakgrunnskonsentrasjon av klorid i grunnvannet i brønnen er på 1,02 mg/l. Bakgrunnskonsentrasjonen i grunnvannet er basert på klorid fra nedbør. Den forholdsvis lille differansen mellom kloridkonsentrasjonen i Bøelva og bakgrunnskonsentrasjonene i grunnvannet kan tyde på at det ikke finnes andre store kilder til klorid i området enn veisalt.

En av grunnene til at de observerte kloridkonsentrasjonene ligger litt høyere enn de simulerte kloridkonsentrasjonene, kan være at strømningsmodellen er stasjonær. Infiltrasjonsmengden av vann og salt endrer seg ikke gjennom året i modellen. De observerte verdiene kan derimot gjenspeile at kloridet kommer i pulser på grunn av at vannmengden og saltmengden som infiltrerer akviferen ikke er konstant. En lagring av klorid i grunnen vil også kunne føre til kloridkonsentrasjonen i brønnen øker med tiden. Bester et al. (2006) fant at store mengder klorid kan lagres i grunnen før det når brønnen.

## 5.22 Alternativ modellering av elv i COMSOL

### 5.22.1 Innledning

Bøelva ble modellert slik at den delte modellen i to. Elva er da en grensebetingelse med konstante verdier for hydraulisk potensial nedover elvestrengen. Et alternativ er en modell der vannfluksen ut og inn av elva blir kvantifisert. Et slikt alternativ kan være det beste i tilfeller der elva ikke har nok vannføring til at elva kan sees som en uendelig vannkilde i forhold til brønnens vannbehov. Dette alternativet vil også gjøre at nedbørsfeltet på andre siden av elva kan være en vannkilde for brønnen.

Alternativet som ble prøvd, kvantifiserte vannfluksen i elva ut fra ett infiltrasjonsscenario.

Infiltrasjonen var  $\alpha_{\text{bart\_fjell}} = 0,05$  og  $\alpha_{\text{løsmasser}} = 1$ . Nedbørsfeltet i denne modellen er ikke likt med modellen som er brukt ellers i oppgaven. Resultatene er derfor ikke sammenlignbare. Formålet med denne beskrivelsen er at andre modeller kan bygge på, og forbedre denne metoden slik at et godt elvelement kan legges inn i COMSOL.

### 5.22.2 Metode elvelement

Ideen er å lage en modell der Bøelva ikke er modellert med konstant hydraulisk potensial, men i stedet som en linje med flere brønner. Utgangspunktet er en modell uten noen form for elv. Denne modellen kalibreres slik at hydraulisk potensial ved utløpet fra Seljordsvannet blir likt høyden til Seljordsvannet. Hydraulisk potensial langs den strekningen hvor elva i realiteten er lokalisert blir ekstrahert fra COMSOL. Verdiene for hydraulisk potensial blir så sammenlignet med høyden til

overflaten av elva. Der hydraulisk potensiale er lavere enn elveoverflaten gir elva vann til akviferen, og der hydraulisk potensiale er høyere enn overflaten gir akviferen vann til elva. I COMSOL blir så elva simulert ved at vannfluksen blir lagt inn som kilder og sluk i form av brønner.

Vannfluksen blir bestemt ut fra Darcy's lov.

Darcy's lov gir:  $Q = A * K * dh/dL$

- 1)  $Q$  = volum vann [ $m^3/s$ ]
- 2)  $A$  = arealet vannet går igjennom (bredden av elva \* lengden av elvesegment) [ $m^2$ ]
- 3)  $K$  = ledningsevnen til elvebunn [ $m/s$ ]
- 4)  $dh$  = differansen mellom hydraulisk potensiale og elveoverflaten ved elva [ $m$ ]
- 5)  $dL$  = tykkelsen på sedimentene på elvebunn [ $m$ ]

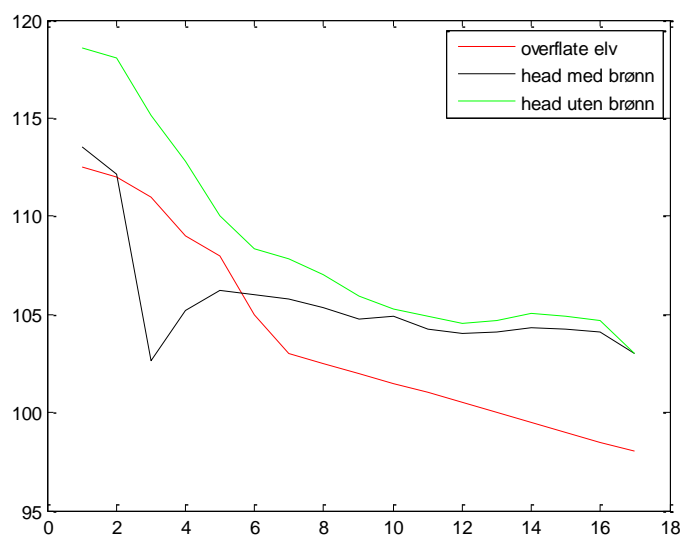
Bredden på elva ble satt til 50 meter og den hydrauliske ledningsevnen til elvebunn ble satt til  $1 * 10^{-8}$  m/s. Overflaten til elva ble satt til topografien – 7 meter. Tykkelsen på sedimentene i bunnen av elva ble satt til 0,1 meter. Det er usikkerheter rundt den hydrauliske ledningsevnen til elvebunn, høyden på elva og tykkelsen av sedimenter på bunn. Topografiverdiene er et resultat av en interpolasjon ut fra et grid på 50m\*50m, og det gir lokale feil. I tillegg vil elveoverflaten i mange tilfeller ligge lavere enn den interpolerte topografien. Elveoverflatens høyde på topografi – 7 m er altså en grov tilnærming. Et MATLAB script ble lagd for å regne ut vannfluksen (se vedlegg C-6). Resultatene er gitt i tabell 5.1.

**Tabell 5.1** Viser vannfluksen langs elvesegmentene som Bøelva er delt opp i. Negative verdier angir at elva avgir vann til akviferen. Positive verdier angir at akviferen avgir vann til elva. De negative verdiene befinner seg i nærheten av brønnen.

Elvesegment	$m^3/år$
1	55112
2	-280236
3	-303815
4	-130382
5	-19788
6	84824
7	117246
8	147211
9	145323
10	170450

11	121687
12	139345
13	226538
14	249546
15	187663
16	325872

Summen av de negative verdiene er  $0,73 * 10^6 \text{ m}^3/\text{år}$ . Det betyr at dette er vannmengden som går ut av elva mot brønnen. I og med at brønnen trekker  $0,8 * 10^6 \text{ m}^3/\text{år}$  så vil i dette tilfellet nesten alt vannet komme fra elva. Med lavere permeabilitet i elvebunnen vil andelen vann fra Bøelva bli betydelig lavere. Figur 5-12 viser hvordan brønnen lager en senkning i head langs elva.



Figur 5-12 Elveoverflate og verdier for hydraulisk portensiale med og uten brønn. Senkningstrakten til brønnen er tydelig der "head med brønn" går under "overflate elv". Y-aksen viser meter over havet og X-aksen viser elvesegmentene langs Bøelva.

### 5.22.3 Konklusjon elvelement

En svakhet med denne metoden er at modellen låste seg til et infiltrasjonsscenario. En endring av vannmengde som infiltrerer modellen vil føre til at vannfluksen langs elva ikke er gyldig lenger. Det beste alternativet hadde vært at vannfluksen varierte med infiltrasjonen i modellen. Å få til dette viste seg å være vanskelig i COMSOL. Grunnen til dette er at funksjonaliteten ikke er kjent, og må sannsynligvis programmeres. Å lage denne funksjonaliteten er utenfor denne oppgavens rammer, men vil være nyttig i fremtidige lignende modeller.

I tillegg er usikkerhetene ved parametrene til Darcy's lov store. Endringer i hydraulisk ledningsevne i elvebunn, tykkelse sedimenter på elvebunn og høyden til elveoverflaten gir store endringer i vannfluksen. Å få gode data på tykkelse av sedimenter og permeabilitet er krevende. Usikkerhet knyttet til disse parametrene vil uansett være en utfordring, selv om funksjonalitet for å legge inn et elvelement skulle finnes.

## 6 KONKLUSJON

Problemstilling: Målet med oppgaven er å lage en metode for å modellere transport av klorid fra vei i grunnvannsakviferer ved å benytte informasjon fra nasjonale hydrologiske og geologiske databaser.

Hypotesen om at vannbalansen er det viktigste elementet når det gjelder transport av klorid i grunnen ser ut til å være riktig. Denne grensebetingelsen har stor innvirkning på kloridkonsentrasjonen i brønnvannet. Usikkerheten rundt hvor mye avrenning det er i et område, og i tillegg hvor mye av dette vannet som infiltrerer grunnen er dermed viktig å minimere så mye som mulig. Vannmålinger i elver i nedbørsfeltet, sammenlignet med totalt vann tilgjengelig som avrenning, kan gi et bilde av hvor mye vann som infiltrerer grunnen. I tillegg kan feltundersøkelser gi et bilde av vannledningsevnen til bergrunn og løsmasser.

Å ha kunnskap rundt hvor mye av brønnvannet som kommer fra elv vil være til stor hjelp for å kalibrere modellen, i tillegg til å si noe om modellens gyldighet. Hvis vannmengden fra elv er kjent og lagt inn i modellen bør det være mulig å gjenskape observerte kloridnivåer i modellen.

Å ha et elveelement som virker som en uendelig sluk/kilde kan være et problem hvis den aktuelle elven i realiteten ikke bidrar med mye vann f.eks på grunn av lite vannføring eller tette sedimenter i elvebunn. Derfor burde fremtidige modeller forsøke å modellere elven slik at det er mulig å simulere dette. I tillegg bør det være mulig å simulere at nedbørsfeltet på andre siden av elva for brønnen kan være en vannkilde.

Numerisk dispersjon er en feilkilde som er viktig å identifisere og minimere. Å minimere numerisk dispersjon vil føre til mindre usikkerhet rundt den numeriske løsningen av transportligningen. Å løse transportligningen numerisk vil være viktig ved modellering av f. eks tungmetaller, der sorpsjon til sedimentene spiller en stor rolle.

For at metoden skal være anvendbar må simulerte og observerte kloridkonsentrasjoner i brønnvannet være av samme størrelsesorden. Det er de. I tillegg må usikkerheten i de simulerte resultatene være av akseptabel størrelse. Dette ser også ut til å være oppfylt, da resultatene kun varierer med 10 mg/l for de forskjellige infiltrasjonsscenarioene.



## 7 LITTERATURLISTE

- Aldrin, M. & Steinbekk, G. H. 2010. Effekt av salting på frysepunkt i veibanen basert på data fra 2005-2009. SAMBA: 37.
- Amundsen, C.E. og Roseth, R. 2004. Utslippsfaktorer fra vei til vann og jord i Norge. Beregning og verifisering av utslippsfaktorer. Rapportnr UTB 2004/08. Statens vegvesen.
- Amundsen, C.E., French, H., Haaland, S., Pedersen, P.A., Riise, G. & Roseth, R. 2008. SaltSMART – Miljøkonsekvenser ved salting av veger – en litteraturgjennomgang, Teknologirapport nr. 2008/2535. Bioforsk.
- Appelo, C. A. J., Postma, D. 1993. Solute transport in aquifers. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 1st ed.; A.A. Balkema: Rotterdam.
- Appelo, C. A. J., Postma, D. 2005. Ion Exchange. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd ed.; A.A. Balkema: Rotterdam.
- Dagan, G.M. 1989. *Flow and transport in Porous Formations*, Springer: New York.
- Bauske, B. and Goetz, D. 1993. Effects of deicing-salts on heavy-metal mobility. *Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica*, 21:38-42.
- Bester, M.L. 2002. Numerical simulation of road salt impact at the Greenbrook well field, Kitchener, Ontario. M.Sc. thesis, Department of Earth Sciences, University of Waterloo.
- Bester, M.L, Frind, E.O, Molson, J.W & Rudolph, D.L. 2006. Numerical Investigation of Road Salt Impact on an Urban Wellfield. *Ground Water* 44: 165–175.
- Beldring, S., Voksø, A. & Roald, L. A. 2002. Avrenningskart for Norge: årsmiddelverdier for avrenning 1961-1990. Dokument (Norges vassdrags- og energidirektorat), b. 2. Oslo: Direktoratet. 49 s.
- Beldring, S., Engeland, K., Roald, L. A., Sælthun, N. R. & Voksø, A. 2003. Estimation of parameters in a distributed precipitation-runoff model for Norway. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7: 304-316.
- Blomqvist, G. 2001. The response of Norway spruce seedlings to roadside exposure of de-icing salt. In: Blomqvist, G.: *De-icing salt and the roadside environment: Air-borne exposure, damage to Norway spruce and system monitoring*. PhD thesis. Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kungl. Tekniska Högskolan. Stockholm.
- Breivik, C. 2010. Mengderapportering vinteren 2009/2010. Teknologirapport nr 2626. Statens Vegvesen.
- Cadran, B., Salva, E. 2011. Hydrology of a waterwork. Transport and retardation of Chloride in groundwater. Internship report at UMB, ENGEES, Strasbourg, France

European Commission 2010: Report from the commission in accordance with article 3.7 of the groundwater directive 2006/118/EC on the establishment of groundwater threshold values, 10 pp. Brussels: European Commission.

Gibson, C.E. og Stewart, D.A. 1972. Changes in the water chemistry of Lough Neagh over a 10-year period. *Limnology and Oceanography*, 17:633-635.

Giles, C. H; Mac Ewan T. H; Nakhwa S. N; Smith, D. 1960. Adsorption part X. A system of classification of solution adsorption isotherms and its use in diagnosis of adsorption mechanism and in measurement of specific surface areas of solids. *J. Chem. Soc.* 3973.

Hakala, A. 2004. Meromixis as a part of lake evolution – observations and a revised classification of true meromictic lakes in Finland. *Boreal Environment Research* 9:37-53.

Haitjema, H., M. 1995. *Analytical Element Modeling of Groundwater Flow*. Academic Press, Inc., San Diego, CA.

Helgestad, M. R., Aagaard, P. & Tuttle, K. 2005. Analyse av regional og lokal grunnvannstrømning på Hovemoen og Korgen vannverk Lillehammer.

Jouin, C. 2011. Data preparation for salt transport modeling in groundwater. Bioforsk, Ås, Norway, 15p.

Kitterød, N.-O., Turtumøygard, S., Aakerøy P. A. og Haaland S. 2010. Estimering av gjennomsnittlig saltfluks fra veg til vannforekomst, Bioforsk Rapport Vol. 5 Nr. 50

Kitterød, N.-O., Turtumøygard, Gaut, S., Jouin, C., Aakerøy P. A. 2011. Salt i grunnvann. Dokumentasjon av datakilder og metodikk for estimering av sårbarhet, Bioforsk Report Vol. 6 Nr. 107

Kitterød, N.-O. 2011. Lecture notes in course Vann200, on numerical difficulties in contaminant transport. Lecture notes, UMB.

Kristiansen, S.M., Christensen, F.D. & Hansen, B. 2009. Vurdering af danske grundvandsmagasiners sårbarhed overfor vejsalt, 107 pp. København: De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland.

Legret, M., Pagotto C. 1999. Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway. *Science of the Total Environment*, 235: 143-150.

Lundmark, A. 2008. Monitoring transport and fate of de-icing chemicals in the roadside environment – modelling and field measurements, PhD thesis, Department of land and water resources engineering, Royal institute of technology (KTH), Stockholm, Sweden

Norrström, A.C og Jacks, G. 1998. Concentration and fractionation of heavy metals in roadside soils receiving de-icing salts. *Science of the Total Environment*, 218, 161-174.

Ramakrishna, D.M. og Viraraghavan, T. 2005. Environmental impact of chemical deicers - A review. *Water Air and Soil Pollution* 166:49-63.

Rhodes, A.L., Newton, R.M. og Pufall, A. 2001. Influences of land use on water quality of a diverse new England watershed. *Environmental Science & Technology* 35(18):3640-3645.

Sellevoid, J. 2011. Transport of road salt to groundwater resources. Master thesis, Institutt for Konstruksjonsteknikk , NTNU, Trondheim, Norway

Sivertsen, Å. 2010. Etatsprogrammet - Salt SMART: NVF – Hurtigruta 11-12/3 2010. Arrangert av Statens Vegvesen. Tilgjengelig fra:<http://www.nvfnorden.org/lisalib/getfile.aspx?itemid=3416>

Trombulak, S. C. and Frissell, C. A. 2000. Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. *Conservation Biology*, 14: 18–30.

## **VEDLEGG A**

Detaljbeskrivelse av modellarbeidet i COMSOL.

### **1 Nedbørsfelt**

Nedbørsfeltet blir angitt i COMSOL med UTM33 koordinater. Koordinatene har blitt ekstrahert ved hjelp av GIS verktøyet Arcmap10.

- Velg model.Geometry
- høyreklikk og velg Bezier polygon.
- Velg Type: Open Curve.
- Velg Add linear og angi x,y koordinater
- Når alle x,y koordindater er lagt inn, velg Build All.

### **2 Elv**

Elven angis med UTM33 koordinater på samme måten som nedbørsfeltet. Koordinatene har blitt ekstrahert ved hjelp av GIS verktøyet Arcmap10.

Begge elvebreddene må legges inn. MATLAB script brukes til å lage den andre elvebredden med utgangspunkt i den første (se vedlegg C-7).

### **3 Brønn**

Brønn angis med UTM33 koordinater, men ved å høyreklikke på Geometry og velge Point som angir brønnen. I tillegg angis en sirkel med samme UTM33 koordinater som brønnen ved å høyreklikke på Geometry og velge Circle. Denne angis en radius på f.eks 20. Grunnen til at den angis en sirkel rundt brønnen er for å kunne visualisere nedslagsfeltet til brønn.

### **4 Vei**

Veien angis med UTM33 koordinater på samme måten som nedbørsfeltet og elven. Koordinatene har blitt ekstrahert ved hjelp av GIS verktøyet Arcmap10. Veien trenger kun en linje, ikke to som elven.

### **5 Topografi**

Topografien importeres som en fil til COMSOL. For at COMSOL skal kunne bruke topografien når den løser fysikken numerisk må det angis en PDE for topografien.

### **6 Løsmasser**

Løsmasser gjøres om til topografi grunnfjell og importeres som en fil til COMSOL. For at COMSOL skal kunne bruke topografien på grunnfjellet når den løser fysikken numerisk må det angis en PDE for topografien til grunnfjellet.

### **7 Nedbør**

Avrenning importeres som en fil til COMSOL. For at COMSOL skal kunne bruke topografien når den løser fysikken numerisk må det angis en PDE for topografien.

## 8 Bakgrunnsverdier salt i grunnvann

Importeret som en fil til COMSOL. For at COMSOL skal kunne bruke bakgrunnsverdiene for salt i grunnvann når den løser fysikken numerisk må det angis en PDE for topografien.

## 9 Fremgangsmåte import av fil til COMSOL

- Velg model.definitions
- Høyreklikk og velg Functions.Interpolation
- Velg Datasource:File
- Velg Browse og finn fila
- Velg Number of arguments: 3
- Velg import
- Gi et passende navn i Function name
- Dette gjøres for topografi, berggrunnstopografi, avrenning og bakgrunnsverdier salt i grunnvann

## 10 Angi PDE for fil

- Høyreklikk modell
- Velg Add Physics
- Velg Mathematics.PDE Interfaces.Coefficient Form PDE
- Klikk blå pil
- Velg Stationary
- Klikk på målflagget
- Dette gjøres for topografi, berggrunnstopografi og bakgrunnsverdier salt i grunnvann

## 11 Variabler

Elvebreddene, veiene og sirkelen rundt brønn kan være lurt å legge inn som variable. Dette gjør det mulig å velge disse geometrielementene som ett element senere i modellen. Dette gjøres ved å velge modell.Definitions. Høyreklikk og velg Selections.Explicit. Deretter legges de aktuelle geometri elementene til i denne variabelen. Sirkelen rundt brønn må det lages en variabel av på denne måten for å kunne se på nedslagsfeltet til brønnen (drawdown circle).

## 12 Mesh

Gridet til modellen angis i venstremenyen ved Mesh. Her kan det velges Physics-controlled mesh eller User-Controlled mesh. I denne modellen ble det valgt Physics-controlled mesh med Element Size: Extremely fine. For å bygge meshet trykk på Build All knappen (blått bilde av en boligblokk).

## 13 Darcy

- Høyreklikk modell
- Velg Add Physics
- Velg Fluid Flow.Porous Media and Subsurface Flow.Darcy's law
- Klikk blå pil

- Velg Stationary
- Klikk på målflagget
- Klikk på Darcy' Law i venstremeny
- Velg de domenene i nedbørsfeltet som Darcy's Law skal løses for. Elven tas ikke med.
- Velg Darcy's Law.Fluid and Matrix Properties
  - o Velg Density:  $1000 \text{ kg/m}^3$
  - o Velg Hydraulic Conductivity:  $\text{if}(\text{dl.H} \leq \text{bedrock}(x,y), 8e-4, 1e-3 * (\text{dl.H} - \text{bedrock}(x,y)))$
  - o Isotropic
  - o Porosity: 0,3
- Velg Darcy's Law.No Flow
  - o Se at det er no flow grensebetingelser i modellens ytterkanter
- Velg Darcy's Law.Initial Values
  - o Velg Hydraulic head og sett en verdi som kan passe nedbørsfeltet. Ikke kritisk hva som velges her
- For å legge inn brønn
  - o Høyreklikk Darcy's Law
  - o Velg Points.Mass Flux
  - o Velg punktet som angir brønnen
  - o Angi pumperater i Inward mass flux:  $-800000[\text{m}^3/\text{year}] * 1000[\text{kg}/\text{m}^3]$
- Angi infiltrasjon til modellen fra nedbør ved å høyreklikke Darcy's Law
  - o Velg Mass Source
  - o Angi de aktuelle domenene i modellen
  - o I  $Q_m$  angi (kun eksempel) :  $\text{if}(\text{dl.H} \leq \text{bedrock}(x,y), 0.5 * \text{runoffTotal}(x,y)[\text{mm}/\text{year}] * 1000[\text{kg}/\text{m}^3], 1 * \text{runoffTotal}(x,y)[\text{mm}/\text{year}] * 1000[\text{kg}/\text{m}^3])$
  - o Dette er en if test som skiller mellom infiltrasjonen i bart fjell og løsmasser.
- For å angi hydraulisk head langs elven høyreklikk Darcy's Law
  - o Velg Hydraulic Head
  - o Angi elvestrekningen ved å angi segmenter langs elven
  - o Angi hydraulic head langs dette segmentet av elven
  - o Dette gjøres flere ganger nedover elven for å etterligne elvens fall nedstrøms
- Gå på Study1.Stationary i venstremeny
- Velg i Physics Selction: Darcy's law og PDE'ene for topografi og berggrunn.
- For å løse Darcy's Law høyreklikk på Study1 og velg Compute.

## 14 Transportligningen

- Høyreklikk modell
- Velg Add Physics
- Velg Chemical Species Transport.Transport of Diluted Species
- Klikk blå pil
- Velg Time Dependant
- Klikk på målflagget
- Klikk på Transport of Diluted Species i venstremeny
- Velg de domenene i nedbørsfeltet som transportligningen skal løses for. Elven tas ikke med.
- Velg Transport of Diluted Species.Convection and Diffusion

- I Velocity Field velg Darcy's velocity field
- I diffusion coefficient velg User Defined, verdi kan være  $5 \cdot (dl.U/0.3)[m^1]$ , 5 er Longitudinal Dispersivity,  $dl.U$  er hastighetsfeltet og 0,3 er porøsiteten
- Velg Transport of Diluted Species.Initial Values
  - Sett Concentration til 0
- Høyreklikk Transport of Diluted Species og legg til Outflow
  - Sett outflow til elvebredden. Angir at saltet går ut i elva. Her kan det være lurt å ha lagd en variabel for elvebredden.
- Høyreklikk Transport of Diluted Species og legg til Inflow for hvert segment av veien. I Concentration sett (kun eksempel):  $5.7[t/year]/58.4[g/mol]/(dl.U \cdot 220)[m^2]$ . Her er 5.7 (t/year) den saltmengden som legges på dette veisegmentet (utledet fra gjennomsnittsmengden til veisalt/km/år). For å måle lengden på veisegmentet høyreklikk Geometry og velg Measurements. 58,4 (g/mol) er molvekten til NaCl,  $dl.U \cdot 220$  er hastighetsfeltet i et punkt multiplisert opp med veilengden. Dette gir mengden vann som strømmer under veien i akviferen.
- Det legges til et inflow element for hvert veisegment.
- I Study2.Time Dependent legg til tiden som transportligningen skal løses for i range: f.eks range(0,3.17e7,9.46e8)
- I Study2.Time Dependent.Physics Selection velg Transport of Diluted Species og PDE'en for bakgrunnssalt i grunnvann.
- I Study2.Time Dependent.Values of Dependent Variables kryss av i boksen Values of variables not solved for. Velg Method.Solution.Velg Study: Study1, Stationary. Dette gjør at modulen for Transport of Diluted Species kan bruke hastighetsfeltet fra modulen Darcy's Law.
- For å løse transportligningen høyreklikk på Study2 og velg Compute.

## 15 Resultat

I Results i venstremenyen visualiseres resultatene fra kjøringen av modellen. Her er det også mulig å kjøre postprosessering av resultatene.

- For å se på headverdiene i modellen høyreklikk på Results og velg 2D Plot Group.
  - Velg Data set: Solution 1
  - Kall den f.eks: Head
  - Høyreklikk på Head og velg Surface
  - Velg Data set: From parent
  - Velg Expression:  $dl.H$  (som er Darcy's Law.head)
  - Klikk på knappen med bilde av en blyant for å se på resultatet
- For å se på nedslagsfeltet til brønnen høyreklikk på Results og velg 2D Plot Group.
  - Velg Data set: Solution 1
  - Kall den f.eks: Catchment of well
  - Høyreklikk på Catchment of well og velg More Plots.Particle Tracing
  - I Particle Tracing velg x component:  $-dl.u$
  - I Particle Tracing velg y component:  $-dl.v$
  - I Particle Tracing.Named Selection velg drawdown circle
  - Klikk på knappen med bilde av en blyant for å se på resultatet

## 16 Integre opp vannmengden over en linje

- Velg *Results*->*Derived Values*->*Line Integration*.
- I Selection velges segmentet som det skal integreres over.
- I Expression skriv  $dl.u * nx + dl.v * ny$  så compute.
- Resultatet vises i resultatfeltet.



## **VEDLEGG B**

Beskrivelse av arbeid i Arcmap10.

### **1 Importere DEM fil til Arcmap10**

- I Arcmap10: Arctoolbox -> conversion tools -> to raster -> Dem to raster
- Velger så DEM filene som skal importeres og konverteres til raster filer.

### **2 Sammenkoble to DEM raster filer**

Bø vannverk lå på grensen mellom to DEM filer slik at disse to måtte kobles sammen til en.

- I Arcmap10: Arctoolbox-> management tools ->raster->create raster catalog
- I Arcmap10: Arctoolbox-> management tools ->raster->copy raster
- I Arcmap10: Arctoolbox-> management tools ->raster->raster catalog to raster dataset

### **3 Importere geografisk grid(x,y) for vannverket til arcmap10**

- Lagret grid\_vannverk som .tab fil
- I Arcmap10: file->add data-> add xy data
- Dermed la gridet med vannverket seg over DEM rasterbildene.

### **4 Klippe raster fil mindre størrelse**

- I Arcmap10: Arctoolbox -> management tools -> raster ->raster processing -> clip

### **5 Lage topografi shp fil (x,y,z)**

Vannverkfila(x,y) må gjøres om til shp point features:

- I Arcmap10: Høyreklikker på vannverkfila -> export data

For å lage ny shp fil(x,y,z) med høydedata(z) :

- I Arcmap10: Arctoolbox-> spatial analyst -> extraction -> extract values to points -> angir punktene (point feature shp filen fra forrige punkt) og raster DEM fila som inneholder høydedataene.

### **6 Eksportere topografi shp fil til ascii fil**

- I Arcmap10: Arctoolbox-> spatial statistics -> utilities ->Export Feature Attribute to ASCII

Kan velge kommaseparert eller semicolon separert format. Velger som output fil en fil som ikke eksisterer så lager Arcmap10 fila der du angir den skal ligge. Denne filen ble importert til COMSOL.

### **7 Definere type kartprojeksjon til shp og raster filer**

- I Arcmap10: Arctoolbox-> Data management tools -> Projections and Transformations -> Define Projection
- Velger så UTM33 projeksjon

## **8 Sammenkoble grid\_vannverk med shp filene for avrenning**

Shp filene for avrenning ble lagd av Cammille Jouin og lå på Bioforsk sine servere.

- I Arcmap10: Velger vannverk shp fila og høyreklikker
- Velger så join and relates -> join -> join data from another layer based on spacial location-> velger avrenning.shp fil -> join

## **9 Lage shp fil for elv, vei eller nedbørsfelt**

- I ArcCatalog10: File->New-> Shapefile->Gi et passende navn
- Klikk på Feature Type->velg type geometri(point)
- Klikk Edit for å angi projeksjon UTM33
- I Arcmap10: Velg add data-> Velg den nye shp filen så legges den til i Arcmap10
- Klikk editor->Velg den nye shp filen.
- I ny create features boks velg organize features
- Klikk new template
- Velg shp fila som layer
- Velg shp fila i create features
- Velg point i construction tool
- Bruk mus til å klikke inn punktene langs elven eller veien
- Når ferdig dobbeltklikk og klikk save edits
- Klikk stop edit

## **10 Legge inn x og y koordinater i shp fil for elv, vei eller nedbørsfelt**

- I Arcmap10: høyre klikk på shp fil
- Åpne attribute table
- Legg til felt for x og y
- Merk den nye kolonnen (x eller y)
- Høyreklikk og velg calculate geometry (en gang for x og en gang for y)

Disse x,y koordinatene ble brukt til å digitalisere elv og vei i COMSOL

## VEDLEGG C

Script i MATLAB.

### 1.

%lager fil med x og y koordinater for et område

%som er stort nok til modellen

clear all;

close all;

format long;

minX = 147000;

maxX = 159500;

minY = 6599550;

maxY = 6611550;

dx = 50;

dy = 50;

%genererer grid

[YI,XI]=meshgrid(minY:dy:maxY,minX:dx:maxX);

[n,m] = size(XI);

xCoords = zeros(1,n\*m);

yCoords = zeros(1,n\*m);

%gjør om grid til matrise med 1 kolonne

xCoords= reshape(XI.',1,[]);

yCoords= reshape(YI.',1,[]);

xyMatrix = [xCoords, yCoords];

save('grid\_bo.txt', 'xyMatrix', '-ascii');

### 2.

%bruker eksisterende løsmassetykkelse data for et område til å

%interpolere løsmassetykkelse for et større område

clear all;

close all;

%leser inn filer for topografi, tykkelse løsmasser og området det skal

%interpoleres for

topo = 'C:\Users\eivind\ås\master\Data\grider\ny\_bo\_område\newtry\topo\_komma\_matlab.txt';

br = 'C:\Users\eivind\ås\master\Data\grider\grid\_estimated\_depth\_to\_bedrock\_model1\_bo.txt';

m = 'C:\Users\eivind\Documents\MATLAB\master\bedrock\mountainMatrise.txt';

format long;

s(1).X=load(topo);

s(2).X=load(br);

s(3).X=load(m);

topography = s(1).X;

bedrock = s(2).X;

mountain = s(3).X;

xTopo = topography(:,1); % x-coordinates

```

yTopo = topography(:,2);    % y-coordinates

bedrock = [bedrock;mountain];
xBedrock = bedrock(:,1);    % x-coordinates
yBedrock = bedrock(:,2);    % y-coordinates
depthBedrock = bedrock(:,3);

%lager et område som det skal interpoleres dybde løsmasser for
dx = 50;
dy = 50;
minx = 147000;
maxx = 1.596125000000000e+005;
miny = 6.598837500000000e+006;
maxy = 6611550;
[XI,YI]=meshgrid(minx:dx:maxx,miny:dy:maxy);

%interpolerer dybde løsmasser ut fra eksisterende data
dybde_interpolasjon = griddata(xBedrock,yBedrock,depthBedrock,XI,YI,'nearest');

%lager fil som lagres
[n,m] = size(XI);
xCoords = zeros(1,n*m);
yCoords = zeros(1,n*m);
dybder = zeros(1,n*m);
xCoords= reshape(XI.',1,[]);
yCoords= reshape(YI.',1,[]);
dybder = reshape(dybde_interpolasjon.',1,[]);
dybdeMatrise = [xCoords,yCoords,dybder];
save('dybdeMatrise.txt', 'dybdeMatrise', '-ascii');

%viser grafisk resultatet
hvor = dybde_interpolasjon < 5;

figure;
imagesc(flipud(hvor));
title('tykkelse løsmasser');
colorbar;

```

### 3.

```

%lager fil med grunnfjellstopografi
clear all;
close all;
%leser inn filer for topografi og tykkelse løsmasser
topo = 'C:\Users\eivind\Documents\MATLAB\master\bedrock\newTopo.txt'
br = 'C:\Users\eivind\Documents\MATLAB\master\bedrock\dybdeMatrise.txt'
format long;
s(1).X=load(topo);
s(2).X=load(br);
topography = s(1).X;
bedrock = s(2).X;
%trekker ut 3 kolonne

```

```

hightTop = topography(:, 3);
hightBot = bedrock(:, 3);
%regner ut grunnfjellstopografi
realHeadValue = hightTop- hightBot;
%lager matrise og lagrer den som fil
realHeadMatrix = topography(:, (1:2));
realHeadMatrix = [realHeadMatrix, realHeadValue];
save('grid_bedrock_amsl_waterwork.txt', 'realHeadMatrix', '-ascii');

```

#### 4.

```

%lager fil for bakgrunnsverdier for salt i grunnvann for Bø

```

```

clear all;
close all;

```

```

format long;
%leser inn fil for bakgrunnsverdier klorid
s = load('C:\Users\eivind\Documents\MATLAB\master\salt\Cl_i_grw_linear__1x1km.mat');
%leser inn filer for utm33 x,y verdier for hele Norge
x = load('C:\Users\eivind\Documents\MATLAB\master\salt\nveX_utm33.mat');
y = load('C:\Users\eivind\Documents\MATLAB\master\salt\nveY_utm33.mat');
% leser inn fil for bøområdet
b = load('C:\Users\eivind\Documents\MATLAB\master\salt\grid_boBigger_topo.txt');

```

```

%viser Norge med bakgrunnsverdier for salt i grunnvann
figure;
%trekker ut salt, x, y verdier fra Norgesgridet
salt = s.Cl_grw_linear;
utmX = x.nveX;
utmY = y.nveY;
imagesc(flipud(salt));

```

```

%trekker ut x og y koordinater for Bøområdet
boX = b(:,1);
boY = b(:,2);
[n,m] = size(salt);
%initierer matriser
xCoords = zeros(1,n*m);
yCoords = zeros(1,n*m);
saltVector = zeros(1,n*m);

```

```

%lager matrise med 1 kolonne av Norges filen og Saltfilen
xCoords= reshape(utmX.',1,[]);
yCoords= reshape(utmY.',1,[]);
saltVector= reshape(salt.',1,[]);
%slår de sammen
xySaltMatrix = [xCoords, yCoords, saltVector];
xySaltMatrix(isnan(xySaltMatrix(:,3)),:)=[];

```

```

%kutter vekk delene av filen som er utenfor Bøområdet (resten av Norge)
vi = xySaltMatrix(:,1)> min(boX);
xySaltMatrix = xySaltMatrix (vi, :);

```

```

%
vi = xySaltMatrix(:,1) < max(boX);
xySaltMatrix = xySaltMatrix (vi, :);

vi = xySaltMatrix(:,2)> min(boY);
xySaltMatrix = xySaltMatrix (vi, :);
%
vi = xySaltMatrix(:,2) < max(boY);
xySaltMatrix = xySaltMatrix (vi, :);

% lagrer filen;
save('backgroundSalt.txt', 'xySaltMatrix', '-ascii');

```

## 5.

```

%finner total avrenning i modellen
clear all;
close all;
averageRunoff = 0.65*0.15;%m/year
catchmentSize = 4.65e7;%m^2
totalRunoff = averageRunoff * catchmentSize

```

## 6.

```

%regner ut vannflux ut og inn av elv ut fra diff mellom topografi og head
%langs elvestreng.
clear all;
close all;
%leser inn fil med x,y koordinater,høyde langs elva, og headverdier med og
%uten brønn langs elva
re = 'C:\Users\evivind\ås\master\elver\topoVsHeadSemiMindreCatchment.csv';
s(1).X=load(re);
riverEast = s(1).X;
%trekker ut dataene i fila
x = riverEast(:,1);    % x-coordinates
y = riverEast(:,2);    % y-coordinates
masl = riverEast(:,3);

headsWithWell = riverEast(:,5);
headsWithoutWell = riverEast(:,4);
%setter opp param til Darcys lov
riverTop = masl - 7;
[n,m] = size(riverEast);
K = 1e-8 * (60*60*24*365);%m/year
widthRiver =50;%meters
thicknessRiverBottom = 0.2; %meters

%regner ut flux ut og inn av elva med brønn
for i=2:n
    %with well
    distance=sqrt((x(i-1) - x(i))^2 + ((y(i-1) - y(i))^2));%length river segment
    head = ((headsWithWell(i-1) + headsWithWell(i))/2);%head along segment
    riverT = (riverTop(i-1) + riverTop(i))/2;%top of river along segment
    deltaHead = riverT - head;

```

```

    QWithWell(i) = -K * (widthRiver*distance) * (deltaHead/thicknessRiverBottom);% darcys law
    m^3/year

end
%regner ut flux ut og inn av elva uten brønn
for i=2:n
    %without well
    distance=sqrt((x(i-1) - x(i))^2 + ((y(i-1) - y(i))^2));%length river segment
    head = ((headsWithoutWell(i-1) + headsWithoutWell(i))/2);%head along segment
    riverT = (riverTop(i-1) + riverTop(i))/2;%top of river along segment
    deltaHead = riverT - head;
    QWithoutWell(i) = -K * (widthRiver*distance) * (deltaHead/thicknessRiverBottom);% darcys law
    m^3/year
end

%viser grafiske figurer av resultatene
axis equal;
plot(riverTop, 'r');
hold on;
plot(headsWithWell, 'black');
legend('overflate elv','head med brønn');
hold on;
plot(headsWithoutWell, 'green');
legend('overflate elv','head med brønn','head uten brønn');
figure;
plot(QWithWell,'black');
QWithWell= QWithWell';
hold on;
plot(QWithoutWell,'red');
QWithoutWell= QWithoutWell';
%lagrer res i fil
save('QWithWell.txt', 'QWithWell', '-ascii');
save('QWithoutWell.txt', 'QWithoutWell', '-ascii');

```

## 7.

```

%lager parallell elvebredde ut fra en eksisterende bredde angitt med x,y
%koordinater
clear all;
close all;
river = 'C:\Users\eivind\ås\master\Data\grider\ny_bo_område\newtry\river2.txt';
format long;
s(1).X=load(river);
river = s(1).X;
points = river(:, (1:2));
xCoords = points(:,1) ;    % x-coordinates
yCoords = points(:,2) ;    % y-coordinates

[n,m] = size(points);
parallellPoints = zeros(n,m);

```

```

%angir bredden på elva
delta = 50;
[k,l] = size(xCoords);
newXCoords = zeros(k,1);
newYCoords = zeros(k,1);

% går igjennom x,y segmenter og lager et nye x,y segmenter parallellt med de
% første
for i=1:(n-1)
    angle = mod(atan2(yCoords(i+1)-yCoords(i),xCoords(i+1)-xCoords(i)),2*pi)*(180/pi);
    parallellAngle = angle - 90;
    if parallellAngle < 0
        parallellAngle = parallellAngle + 360;
    end

    length = norm(yCoords(i+1),yCoords(i));

    if angle > 0 && angle < 180
        newX1 = xCoords(i) + abs((cos(parallellAngle)*delta));
        newX2 = xCoords(i+1) + abs((cos(parallellAngle)*delta));
    else
        newX1 = xCoords(i) - abs((cos(parallellAngle)*delta));
        newX2 = xCoords(i+1) - abs((cos(parallellAngle)*delta));
    end
    newY1 = yCoords(i) - abs((sin(parallellAngle)*delta));
    newY2 = yCoords(i+1) - abs((sin(parallellAngle)*delta));

    newXCoords(i,1) = newX1;
    newYCoords(i,1) = newY1;
    newXCoords(i+1,1) = newX2;
    newYCoords(i+1,1) = newY2;
    parallellPoints;

end
figure
axis equal;
plot (xCoords, yCoords, 'b')
hold
plot (newXCoords, newYCoords, 'm')
hold off
parallellElveMatrix = [newXCoords, newYCoords];
%lagrer fil
save('parallellElvFil.txt', 'parallellElveMatrix', '-ascii');

```

## 8.

```

%regner ut mg klorid pr liter for veien ved Bø vannverk
%må gjøre dett for hvert veisegment
clear all;

```



```
close all;
%leser inn fil med mengde salt langs veien
re = 'C:\Users\eivind\ås\master\salt\kunsalt_grid_cvs.csv';

s(1).X=load(re);
saltFil = s(1).X;

salt = saltFil(:,3);
averageSalt = sum(salt) / (9409);%lengden fra hele veien med salt.tatt fra Comsol.measure
appliedSalt = averageSalt * 200% salt langs veisegment.tatt fra Comsol.measure
appliedSaltInGrams = appliedSalt * 1e6;
molSalt = appliedSaltInGrams / 58.5;
molPrCubicWater = molSalt/800000;
mgCloridPrLitre = molPrCubicWater * 35.4
```