
Dokumentationsrapport for den geologiske kortlægning i Mønsted-Daugbjerg OSD



0. Resume.....	4
1. Introduktion.....	5
1.1 Formål	5
1.2 Modelnøjagtighed	5
1.3 Modelområde	6
2. Tekniske data	7
2.1 Synkronpejledata.....	7
2.2 Geologisk model	7
2.3 Data til grundvandmodel.....	7
2.4 Rapporter.....	7
3. Geologi.....	9
3.1 Tektonik og salthorst aktivitet.....	9
3.2 Landskabsformer.....	9
3.3 Overordnet stratigrafi	11
3.3.1 Postglaciale aflejringer.....	11
3.3.2 Istidsaflejringer	11
3.3.3 Danien Kalk	11
3.3.4 Skrivekridt.....	11
3.3.5 Oligocæne aflejringer.....	11
3.3.6 Eocæne aflejringer	12
3.4 Undersøgelsesboringer.....	12
3.6 Geologisk model for undersøgelsesområdet	13
4. Hydrogeologi	16
4.1 Grundvandspotentiale og vandløbsafstrømning.....	19
4.2 Grundvandskemi	20
4.3 Vandtype	21
4.4 Nitrat og nitratfronten	22
4.5 Nitratreduktion, ionbytning og forvitningsgrad.....	26
4.6 Sulfat	27
4.7 Arsen	28
4.8 Nikkel.....	29
4.9 Saltvand.....	29
4.10 Pesticider.....	29
5. Modelopstilling	30
5.1 Modelafgrænsning	30
5.2 Randbetingelser.....	31
5.2.1 Vandløb.....	31
5.2.2 Indvindinger	33
5.2.3 Infiltration	35
5.3 Zonering af hydrauliske ledningsevner.....	35
6. Kalibrering	38
6.1 Parameterbånd.....	38

6.2 Kalibreringsjournal	39
6.2.1 Indledende grovkalibrering	39
6.2.2 Invers kalibrering	43
6.2.3 Resultater af den inverse kalibrering – kvantitative og kvalitative.....	43
6.3 Modelsvagheder	50
7. Modelscenarier.....	52
7.2 Aldersfordeling af indvundet grundvand og nitratudvikling	53
7.3 Mulige indsatser overfor nitrat.....	56
7.4 Anbefalinger i forhold til mulige indsats overfor nitrat.....	59
Referencer	61

0. Resume

Den samlede grundvandsdannelse i OSD er af modellen beregnet til 2,8 mill. m³/år. Ved en B1/B2-målsætning (maksimal påvirkning af medianminimumsafstrømning på hhv. 10 og 15%) af vandløbene i området giver det tilgængelig grundvandsressource til indvinding på 280.000-425.000 m³/år. Den samlede indvinding (vandværker, private indvindinger og markvandingsboringer) udgør i dag 90.000 m³/år. Den tilgængelige grundvandsressource overstiger derfor langt det fremtidig behov for grundvandsindvinding. Ifølge "Vandforsyningsplanen 1995-2005 for Fjends Kommune" er det fremtidig for Mønsted og Daugbjerg Vandværker hhv. 123.000 og 52.000 m³/år. De aktuelle indvindinger er dog langt mindre i dag.

Da kriterierne for hvornår en vandværksindvinding i Viborg Amt betegnes som nitratfølsom er bestemt ved at nitratinholdet i det indvundne vand ikke må overskride 25 mg/l inden for 200 år, så ses det af vandanalyserne for vandværkerne, at det kriterier allerede er overskredet kort tid efter etableringen af kildepladsen for Daugbjerg Vandværk. For Mønsted Vandværk skete overskridelsen midt i 1990'erne. Derfor må indvindingerne for begge vandværker betegnes som nitratfølsomme, og de er derfor indsatsområder med hensyn til nitrat.

Den billigste og mest sikre indsatsplan overfor nitrat vurderes at være en flytning af vandværkernes kildepladser til Daugbjerg Plantage. Den dyreste indsatsplan vurderes at være en braklægning af en del af det grundvandsdannende opland til vandværkerne.

I scenarieberegningen hvor 1/3 af indvindingsoplandet braklægges svarer det til 8 ha for Mønsted Vandværk og til 5 ha for Daugbjerg Vandværk. Modelusikkerhed taget i betragtning, vil det være nødvendigt at udpege et areal som minimum er det dobbelt af det areal som grundvandsmodellen udpeger til at være det grundvandsdannende opland. Dvs. for Mønsted Vandværk ca. 16 ha og for Daugbjerg Vandværk ca. 10 ha. Benyttes modellen fra indsatsplanlægningen, hvor vandværket opkøber jorden, får tinglyst, at arealet kun fremover må bruges til vedvarende græs, og sælger arealet tilbage til landmanden til ca. en 1/3 af den oprindelige købspris vil udgifter for Mønsted Vandværk være 1,1 mill. kr. og for Daugbjerg Vandværk 650.000 kr. svarende til 1,5 kr/m³ i merudgift for den enkelte forbruger over en 10 årig periode.

Flyttes indvindingerne til plantageområdet vil de skønnede udgifter til ny kildeplads, ny ledninger og evt. ombygning på vandværket beløbe sig til 500.000 – 700.000 kr. for hvert af vandværkerne. Økonomisk betragtet vil en flytning af kildepladsen derfor være at foretrække. Problemet med flytningen af en kildeplads kan dog være at man støder på uforudsete vandkvalitetsproblemer i plantageområdet. Det kan være i form af naturligt forekommende stoffer – f.eks. kloroform eller arsen eller miljøfremmede stoffer fra ukendt forureninger.

Flyttes kildepladserne til plantageområdet kan indvindingerne fremtidssikres yderligere ved at udnytte regionplanes udpegede skovrejsningsområder. De grundvandsdannende arealer til de forslåede nye kildepladser som falder indenfor de udpegede skovrejsningsområder kan derfor med fordel plantes med skov.

1. Introduktion

Denne rapport beskriver og dokumenterer arbejdet med de enkelte delelementer som indgår i den geologiske kortlægning i Mønsted-Daugbjerg OSD i forbindelse med den gebyrfinansierede kortlægning og indsatsplanlægning. Rapporten er disponeret efter kapitel 14 i ”Ståbi i grundvandsmodellering” /1/. Opstilling og indlæsning af data i den numeriske grundvandsmodel er foretaget af WaterTech A/S /2/. Viborg Amt har foretaget en indledende grovkalibrering af modellen. Efterfølgende har WaterTech A/S foretaget en slutkalibrering med anvendelse af en invers metode /3/.

1.1 Formål

Formålet med den geologiske kortlægning er bestemme den tilgængelige grundvandsressource, indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande til eksisterende og fremtidige vandværker i området, samt generelt at udpege områder hvor grundvandet til de primære grundvandsmagasiner dannes. Grundvandsmodellen, der bruges til bestemmelse af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande, opstilles og kalibreres som en stationær grundvandsmodel, som beskriver en sommerperiode (minimumssituation).

1.2 Modelnøjagtighed

Det er målet, at grundvandsmodellen kalibreres således at den opfylder kriterierne til ”high fidelity” /1/. Til kalibrering af modellen er der benyttet 72 boringer som er lokaliseret, kotesat med GPS udstyr, og synkronpejlet i 2003. Der udover er der udført 10 synkron vandføringsmålinger i 2003 som også indgår i kalibreringen af modellen. Til validering af modellen er der brugt 52 boringer. Disse boringer er ikke brugt i kalibreringen idet data brugt til kalibrering og validering ikke kan antages at være uafhængige hvis de stammer fra samme boring. Boringerne til validering stammer fra Jupiter boringsdatabasen.

I forbindelse med kalibrering af modellen er der udført invers kalibrering. For at kunne udføre den inverse kalibrering er hver synkronpejlet boring tildelt en usikkerhed (udtrykt ved en standardafvigelse) i henhold til nationale retningslinjer /1/. Det samme er udført for boringer som indgår i validering af modellen.

Af Tabel 1 fremgår tildelingen af usikkerheder på hhv. kalibrerings- og valideringsdata. Den gennemsnitlige standardafvigelse er beregnet af WaterTech A/S /2/. Af appendiks A fremgår beregningen af usikkerhederne for observationsdata for boringer og vandføringsmålinger.

Lag	Std – kalibrering [m]	Std – validering [m]
1	1,50	2,00
3	1,50	2,00
5	1,50	2,00

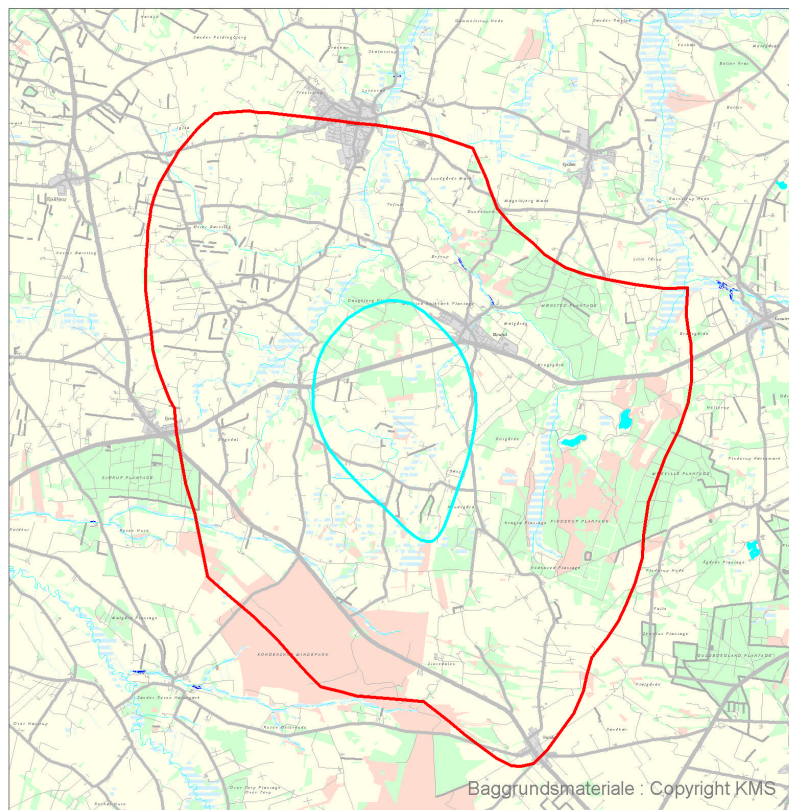
Tabel 1. Gennemsnitlige standardafvigelser [m] på benyttede pejlinger til kalibrering og validering.

Af Tabel 1 ses, at den gennemsnitlige standardafvigelse for lag 1, 3 og 5 er 1,50 meter for kalibreringsdata, og ca. 2,00 meter for valideringsdata. Forskellen mellem standardafvigelserne for hhv. kalibrerings- og valideringspejlingerne skyldes, at kalibreringsboringerne er synkronpejlet og GPS kotesat, mens der for valideringsboringerne kun findes gennemsnitspejlinger, og at koteaflysninger er foretaget fra 4-cm kort.

1.3 Modelområde

Modellen dækker et areal på ca. 108 km² og strækker sig fra Stoholm i nord til Grønhøj i syd, se figur 1. Centralt i området ligger Mønsted-Daugbjerg OSD som er ca. 13 km². Grunden til at modelområdet er forholdsvist stort i forhold til OSD'et er 1. at undgå randeffekter i beregningerne indenfor OSD'et, og 2., at få dækket den del af Viborg Amt af en grundvandsmodel (det er planlagt, at når den gebyrfinansierede kortlægning er afsluttet så er hele Viborg Amt dækket af et antal regionale grundvandsmodeller).

Der er i 2003 og 2004 udført geofysiske undersøgelser og etableret undersøgelsesboringer i området. De geofysiske undersøgelser består af 194 TEM sonderinger og 21,6 km MEP. Undersøgelserne er afrapporteret som datarapporter /4/ og /5/.



Figur 1. Modelområde og Mønsted-Daugbjerg OSD

2. Tekniske data

Kapitlet indeholder en oversigt over datafiler med en kort beskrivelse af deres indhold. Datafilerne er brændt på en CD-rom, og er vedlagt denne rapport. CD-rommen indeholder følgende mapper:

Synkronpejledata
Geologisk model
Data til grundvandsmodel
Scenarieregninger
Rapporter

De geofysiske data er indberettet til GERDA databasen, og ligger derfor ikke på CD rommen.

2.1 Synkronpejledata

I mappen findes data fra synkronpejlerunden udført i august 2003. Det er synkronpejling af brønde og boringer i området, samt synkronvandføringsmåling foretaget af Hedeselskabet A/S. Pejlingerne er indberettet til Jupiter databasen ved GEUS.

2.2 Geologisk model

Den geologiske model er bygget op ud fra 83 profiler i programmet GeoBase. De eksporterede højdemodeller ligger på CD rommen.

2.3 Data til grundvandsmodel

I folderen ligger:

- Alle input data til grundvandsmodellen
- Invers kalibreret grundvandsmodel
- Modelscenarier, aldersfordeling af indvundet vand og beregning af nitratudvikling for Mønsted og Daugbjerg Vandværker

Den færdig inverterede model hedder ”MD_kal_080405”. **Det er den model der benyttes til simulering af trykniveau og vandløbsafstrømning, samt bestemmelse af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande.** MapInfo tabellen ”props” indeholder alle indput data og alle parameterverdier knyttet til hver enkelt celler (top- og bundkote, hydraulisk ledningsevne o.s.v.). ”MD_val_080405” er valideringsmodellen.

2.4 Rapporter

I folderen ligger alle de rapporter som hører til hele den geologiske kortlægning i Mønsted-Daugbjerg OSD. Det er følgende rapporter

- Afrapportering af geofysiske undersøgelser, maj 2003
- Afrapportering af geofysiske undersøgelser, september 2004
- Opstilling af grundvandsmodel for Mønsted-Daugbjerg OSD, juni 2005
- Inverskalibrering af Mønsted-Daugbjerg grundvandsmodel, juni 2005

- Dokumentationsrapport for Mønsted-Daugbjerg OSD, oktober 2005

Alle rapporter ligger på pdf format.

3. Geologi

I forbindelse med den geologiske kortlægning i Mønsted-Daugbjerg OSD skal der udarbejdes en digital geologisk model. Modellen skal udgøre det hydrogeologiske grundlag for en grundvandsmodel i området. Den geologiske model bygges op ud fra boringsoplysninger (PC-Jupiter data) og geofysiske data /4/ og /5/ indsamlet i undersøgelsesområdet.

Den geologiske model opstilles ved udarbejdelse af en række repræsentative profiler for modelområdet. Efterfølgende opstilles der en geologisk konceptuel model udtrykt ved en række højdemodeler. Højdemodellerne dannes ud fra tolkede geologiske profiler i programmet GeoBase.

3.1 Tektonik og salthorst aktivitet

Centralt i OSD er geologien stærkt påvirket af Mønsted Salthorsten, som har skudt de underliggende prækvartære og kvartære aflejring op, og gennembrudt disse, fra flere kilometers dybde. Således findes der højtliggende Danienkalk i området som ellers på undergrundskortet er præget af miocæne aflejringer /Geologisk Set. Det mellemste Jylland/. Salthorsten menes, under sidste istid, at være styrende for isens bevægelser. Salthorsten har ligeledes været styrende for forløbet af Mønsted Å og Jordbro Å som hhv. løber på den østlige og vestlige del af salthorstens flanker, for at løbe sammen nord for salthorsten ved Stoholm.

Skrivekridtets lille tykkelse i salthorstområdet tyder på, at den eksisterede som en højdestruktur på Kridthavets bund, da skrivekridtet blev aflejret. Undersøgelingsboringen DGU nr. 66.1895 etableret umiddelbart syd for Viborgvej mellem byerne Mønsted og Daugbjerg synes at underbygge dette. I boringen der fra terræn til 23 mut. anboret kvartære aflejringer. Fra 23 mut. og til 114 mut. er der anboret prækvartært ler i form af glimmerler og fed Eocænt ler. Nord og syd for boringen findes kalkoverfladen imidlertid 20-40 mut. Det tolkes således, at kalkoverfladen er presset op af salthorsten hvorunder kalken er revnet i en nord-syd gående struktur umiddelbart syd for Viborgvej mellem Mønsted og Daugbjerg. Efterfølgende er der i sprækkestrukturen i tertiæret aflejret Eocænt ler og glimmerler fra Oligocæn. Kalkoverfladen er ikke anboret i undersøgelingsboringen.

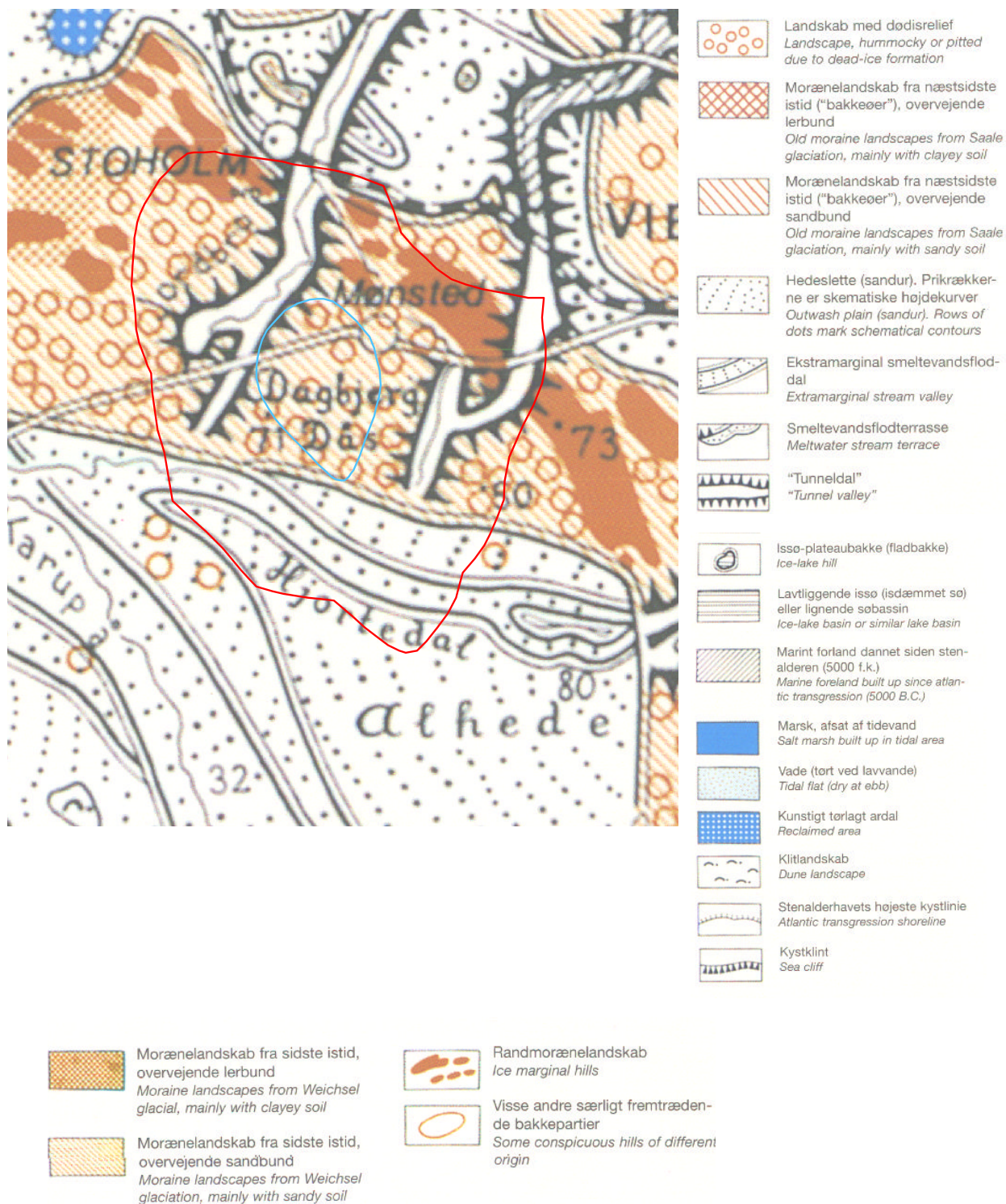
3.2 Landskabsformer

Områdets landskabsformer består af randmoræneområder, dødislandskab, hedeslette, tunneldale og smeltevandsfloddale. Fordelingen af landskabselementer fremgår af Figur 2.

Der er et skarpt skel i landskabsformerne som deles i to grupper af hovedopholdslinjen fra sidste istid; i den nordlige og østlige del findes morænelandskabet med randmoræner, dødislandskab og tunneldale, og i den sydlige del hedeslette med smeltevandsfloddale (Hjortedal).

Hjortedal har ved isens tilbagesmeltning i sidste istid afdrænet til Faldborgdalen/Nørreå dal systemet og videre ud i Mariager Fjord. Mønsted Å/Mønsted Bæk og Jordbro Å har afdrænet mod nord til Hjarbæk Fjord.

I dødislandskabet foran randmorænen findes der i dag adskillige små vandhuller og søer dannet af dødisen. Efter dødislandskabet følger hedesletten som udelukkende består af smeltevandssand afsat ved isens tilbagesmeltning. Under smeltevandssandet på hedesletten kan der findes moræneler-aflejringer og smeltevandsler afsat under tidligere istider, og i perioder hvor isen fra sidste istid havde en større udbredelse.



Figur 2. Landskabselementer i undersøgelsesområdet (Per Smed. Geografforlaget, 1981)

3.3 Overordnet stratigrafi

Geologien i undersøgelsesområdet er meget kompleks. De kvartære aflejringer kan som før omtalt deles i to; moræneaflejringer i nord og nordøst og smeltevandsaflejringer i den sydlige del af området. Centralt i Mønsted Daugbjerg OSD findes præ-kvartære aflejringer (Danien Kalk) blottet på flere lokaliteter som følge salthorstaktiviteten i området. På flankerne af den oppressede kalk findes skråtstillede tertiære aflejringer bestående af Oligocænt glimmerler og fed Eocænt ler.

3.3.1 Postglaciale aflejringer

Der findes postglaciale aflejringer i ådalsområderne ved Mønsted Å/Rosborg Sø, Mønsted Bæk, Jordbro Å og andre ådale i undersøgelsesområdet. Aflejringer består typisk af tørv.

3.3.2 Istidsaflejringer

I OSD findes der en tynd sekvens af smeltevandsand med en tykkelse på 5-20 meter. Smeltevands-sandet underlejres i nogle områder smeltevandsler/moræneler. Generelt er lerdækket tyndt og usammenhængende. I store områder af OSD eksisterer lerdækket ikke. De ringe tykkelser af istidsaflejringer skyldes at salthorststrukturen har presset de underliggende lag op, hvorefter de er eroderet bort.

I det øvrige undersøgelsesområde findes de største mægtigheder af smeltevandssand/morænesand i den sydlige og den nordlige del af undersøgelsesområdet. De største mægtigheder af smeltevandsler/moræneler findes i randmoræneområdet i den østlige og nordlige del af området, samt i den sydlige del af området.

3.3.3 Danien Kalk

Danien Kalk er rigt repræsenteret i borerne centralt i OSD, og kan ses blottet på flere lokaliteter i området. Danien kalken findes typisk 20 – 40 mut. centralt i OSD og dykker ud mod flankerne af salthorststrukturen ned til 400 – 500 meters dybde. Områdets 2 vandværker, Mønsted og Daugbjerg, som ligger centralt i OSD, indvinder fra Danien kalken. Derudover indvinder flere private vandforsyninger og markvandinger fra Danien kalken. Den oppressede Danien kalks mægtighed centralt i OSD varierer fra 5-40 meters tykkelse.

3.3.4 Skrivekridt

Skrivekridtet er ligesom Danien kalken rigt repræsenteret i OSD. Der er i borer (bla. DGU. nr. 66.1433 og 66.1741) anført op til 30 meter skrivekridt. Skrivekridtets største mægtighed i OSD er ikke kendt, men skønnes at være større end 100 meter.

3.3.5 Oligocæne aflejringer

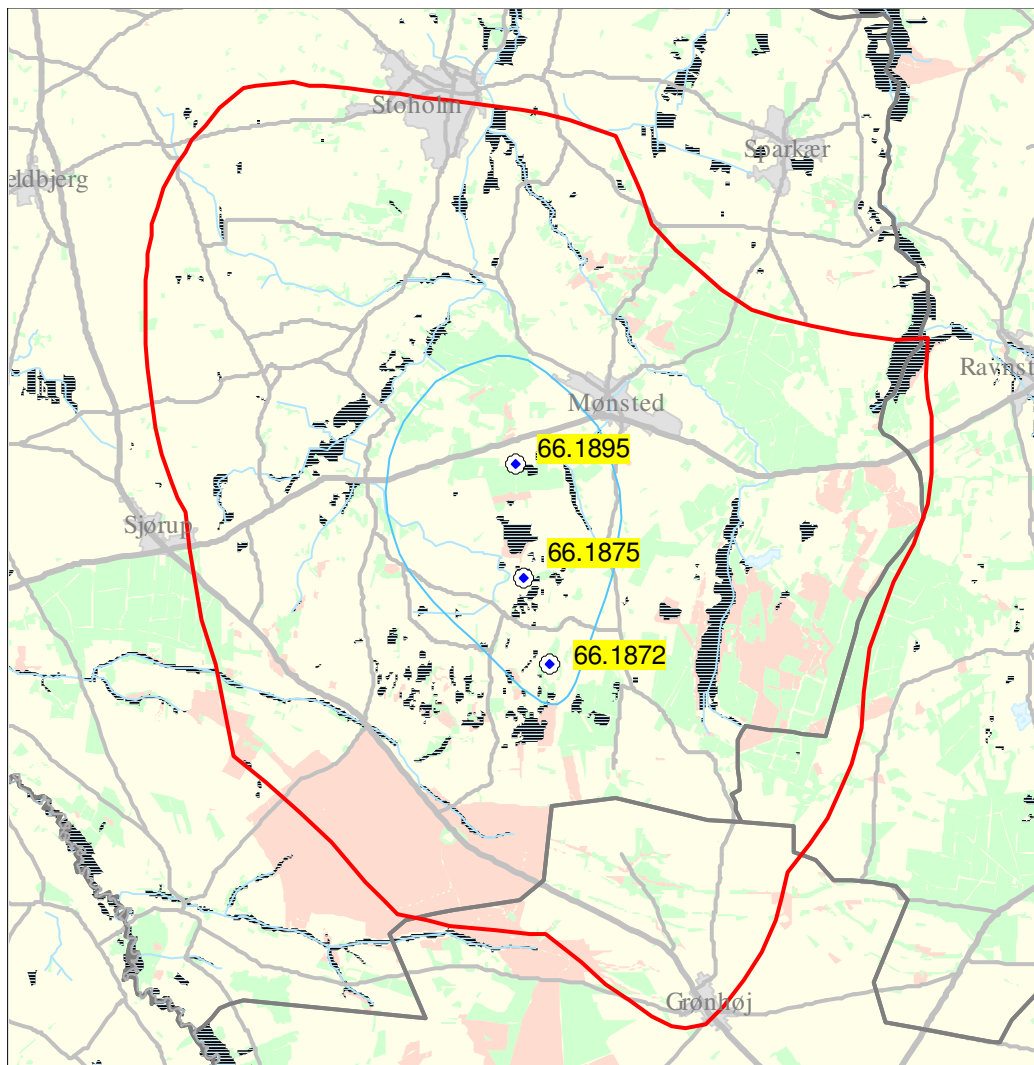
Uden for salthorststrukturen findes der store mægtigheder af oligocæne sedimenter repræsenteret ved primært glimmerler og –silt og kvartssand. Det relative store indhold af mineralet glimmer gør at disse sedimenter er svære at kortlægge med geofysiske metoder pga. deres store variationer i elektrisk modstand. Glimmerleret og –silt er fundet i undersøgelsesboringerne DGU nr. 66.1872 og 66.1875 i den sydlige del af OSD.

3.3.6 Eocæne aflejringer

Uden for salthorststrukturen er der i undersøgelsesboring DGU. 66.1875 anført fed eocænt plastisk ler.

3.4 Undersøgelsesboringer

Til udredning af de geologiske forhold, og til bekræftelse af de geofysiske målinger i området, er der udført 3 undersøgelsesboringer i undersøgelsesområdet. Placeringen af boringerne fremgår af Figur 3. Den lithologiske beskrivelse fremgår af bilag 1.



Figur 3. Undersøgelsesboringer

Den første boring DGU nr. 66.1872 er etableret i oktober 2003 i den sydlige del af undersøgelsesområdet ved Søvsø. Boringen er etableret med det formål at bekræfte de geofysiske målinger, og for at få geologiske oplysninger til større dybde i et område hvor der ikke i forvejen var nogle dybe boringer.

Der er i boringen anført et øvre frit grundvandsmagasin på 19 meter bestående af smeltevands-sand. Dette er underlejret af 2 meter smeltevandsler. Derunder findes der 2 enheder smeltevands-

sand på hver 8 meter adskilt af 3 meter smeltevandsler. Den nederste enhed smeltevandssand underlejres af 36 meter lysbrun-mørkbrun glimmerholdigt ler. Dette ler er tolket som prækvartært ler. Under denne ler findes der 9 meter groft lysegrå sand tolket som kvartssand.

Den anden boring DGU nr. 66.1875 er etableret i december 2003 1,5 km nord for boring DGU nr. 66.1872. Boringen er etableret med det formål at bore igennem de kvartære sedimente og prækvartære lerede sedimente, og ned i danienkalk/skrivekridt for at undersøge muligheden for at indvinde grundvand fra kalksedimenter som er overlejret af beskyttende lerede sedimente, og for at undersøge vandkvaliteten i de dybereliggende kalksedimenter. Kalkoverfladen blev dog ikke anbo-ret idet denne lå væsentligt dybere end beregnet ud fra de udførte TEM sonderinger i området.

Der er i boringen anbo-ret et øvre frit grundvandsmagasin på 27 meter bestående af smeltevands-sand. Dette er underlejret af 4 meter prækvartært glimmerler. Derunder findes der 4 meter fint glimmerholdigt sand. Dette underlejres af 8 meter glimmerler. Glimmerleret underlejres af 23 meter vekslende glimmerholdige lag af fint sand og ler. Under denne enhed er der boret 36 meter ned i fed plastisk eocænt ler.

Den tredje og sidste boring DGU nr. 66.1895 er etableret i september 2004 mellem byerne Mønsted og Daugbjerg umiddelbart syd for Viborgvej. Boringen blev etableret med det formål at verificere de geofysiske undersøgelser (TEM og MEP) som indikerer at der i et nord-syd gående strøg mellem byerne Mønsted og Daugbjerg findes et lerlag som ligger i en indsynkning eller sprække i kalken.

Der er i boringen anbo-ret et øvre frit grundvandsmagasin bestående af 14 meter smeltevandssand. Dette er underlejret af 6 meter moræneler. Moræneleret underlejres af 5 meter smeltevandssand. Smeltevandssandet underlejres af 35 meter glimmerler, som underlejres af 33 meter grågrøn Lillebæltssler. Lillebæltssleret underlejres af 8 meter rødbrunt Røsnæsler. Under Røsnæsleret er der anbo-ret 13 meter paleocænt ler.

3.6 Geologisk model for undersøgelsesområdet

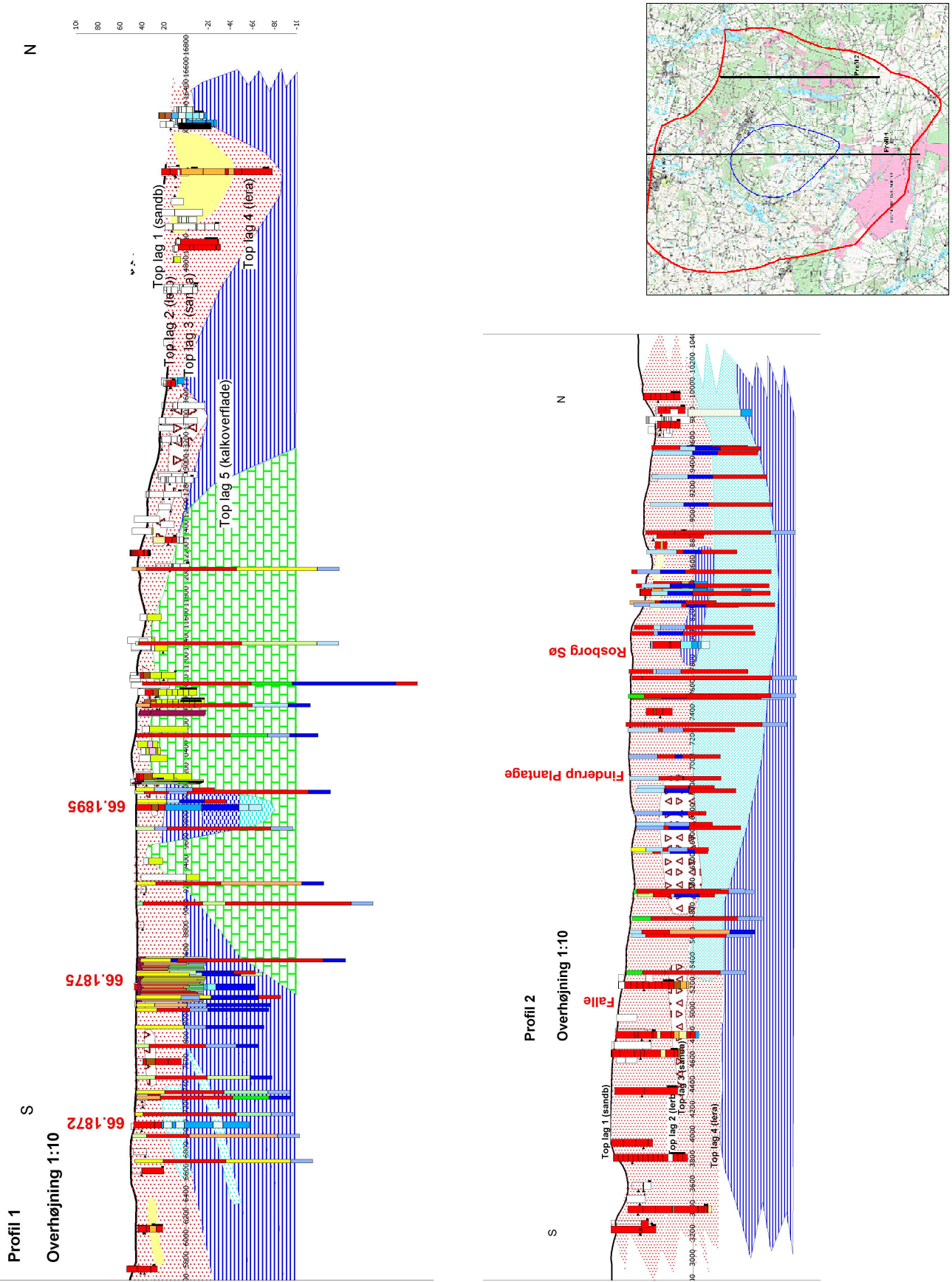
Med baggrund i tolkning af resultaterne fra den geofysiske kortlægning, eksisterende boringer og undersøgelsesboringer opstilles der først en geologisk model som bedst muligt beskriver den geolo-giske opbygning af undersøgelsesområdet. Følgende lithologiske enheder findes i området:

Lag	Lithologi
1	Smeltevandssand/morænesand
2	Smeltevandsler/Moræneler
3	Smeltevandssand/morænesand
4	Miocænt kvartsand
5	Oligocænt ler
6	Eocænt ler
7	Danienkalk
8	Skrivekridt

På Figur 4 ses 2 repræsentative profiler for undersøgelsesområdet. Af profil 1 ses, at i salthorstom-rådet hvor kalkoverfladen er højtliggende er den kvartære lagpakke meget tynd. I det område over-

lejres Danienkalken direkte af kvartære sedimenter. På flankerne dykker kalkoverfladen til stor dybde, og her overlejres danienkalken af Neogene og paleogene sedimenter (glimmerler og eocænt Lillebæltssler), og en større kvartær lagpakke af vekslende sand- og lerlag. I randmoræneområdet mod nord, ses de største mægtigheder af morænelers- og morænesandsaflejringer. Mod syd, hvor den prækvartære overflade ligger højere, ses mindre mægtigheder af primært smeltevandsler- og smeltevandssandaflejringer.

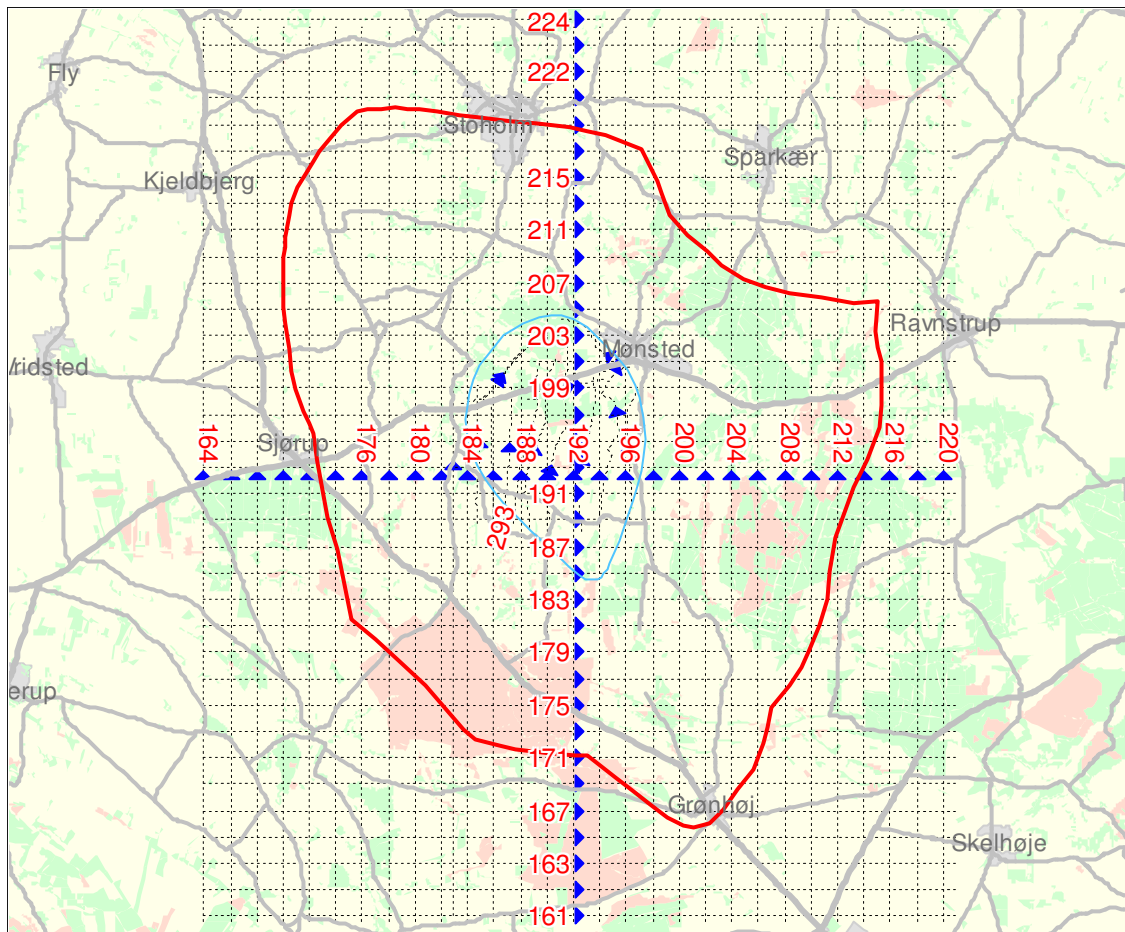
Af profil 2 ses, at i den østlige del af området, ved Rosborg Sø og Finderup Plantage, findes der et større grundvandsmagasin bestående af Miocænt kvartssand. Af profilet ses endvidere at lag 6, 7 og 8 ikke er repræsenteret i den del af undersøgelsesområdet. I den del af undersøgelsesområdet er kalken så dybtliggende at der ikke forventes at foregå en fersk grundvandsstrømning.



Figur 4. Profiler i undersøgelsesområdet

4. Hydrogeologi

Efter opstilling af den geologiske model opstilles der en geologisk konceptuel model. Denne model er en forsimpning af den geologiske model. Den Konceptuelle model bygges op af højdemodel-ler/lagflader, som til sidste læses ind i en numerisk grundvandsmodel. De forskellige stratigrafiske enheder tildeles efterfølgende hydrauliske egenskaber afhængig af om det er sand, ler eller kalk. Højdemodellerne udarbejdes ved lægge et net af profiler ud over området som skærer hinanden vinkelret. Placering af profillinjerne ses på Figur 5.



Figur 5. Profillinjer til opbygning af højdemodeller

Følgende hydrostratigrafisk model opstilles for undersøgelsesområdet:

Lag	Lithologier	Hydrostratigrafisk enhed
1	Morænesand- og smeltevandssand	Top sandb (=terrænoverflade)
2	Moræne- og smeltevandssler	Top lerb
3	Miocænt kvartssand, moræne- og smeltevandssand	Top sanda
4	Oligocænt-miocænt glimmerler, moræne- og smeltevandssler	Top lera
5	Danienkalk/skrivekridt, opsprækket	Top af kalk, opsprækket
6	Danienkalk/skrivekridt	Top af kalk

Af ovenstående tabel ses, at Danienkalken og skrivekridtet udgør én hydrostratigrafisk enhed. Ved implementering i grundvandsmodellen forudsættes, at kalken er opsprækket i de øverste 30 meter. I

den del af kalken foregår der en fersk grundvandsstrømning. Dybere end 30 meter antages det, at grundvandsstrømningen er ubetydelig. Dvs., at grundvandsmagasinet bestående af kalk overalt får en mægtighed på 30 meter hvor det forefindes. Isopach kort for de enkelte lag fremgår af bilag 1a.

Lag 2 består af glimmerler og moræneler- og smeltevandsler. Uden for salthorstområdet udgør toppen af lag 2 (lera) bunden for grundvandsmodellen. Her overlejrer glimmerleret kalken. Inde over salthorstområdet eksisterer der ikke tertiært ler, men derimod findes der moræne- eller smeltevandsler, som direkte overlejrer kalken. Derfor udgøres lag 2 af ovenstående lithologier i den hydrostratigrafiske model.

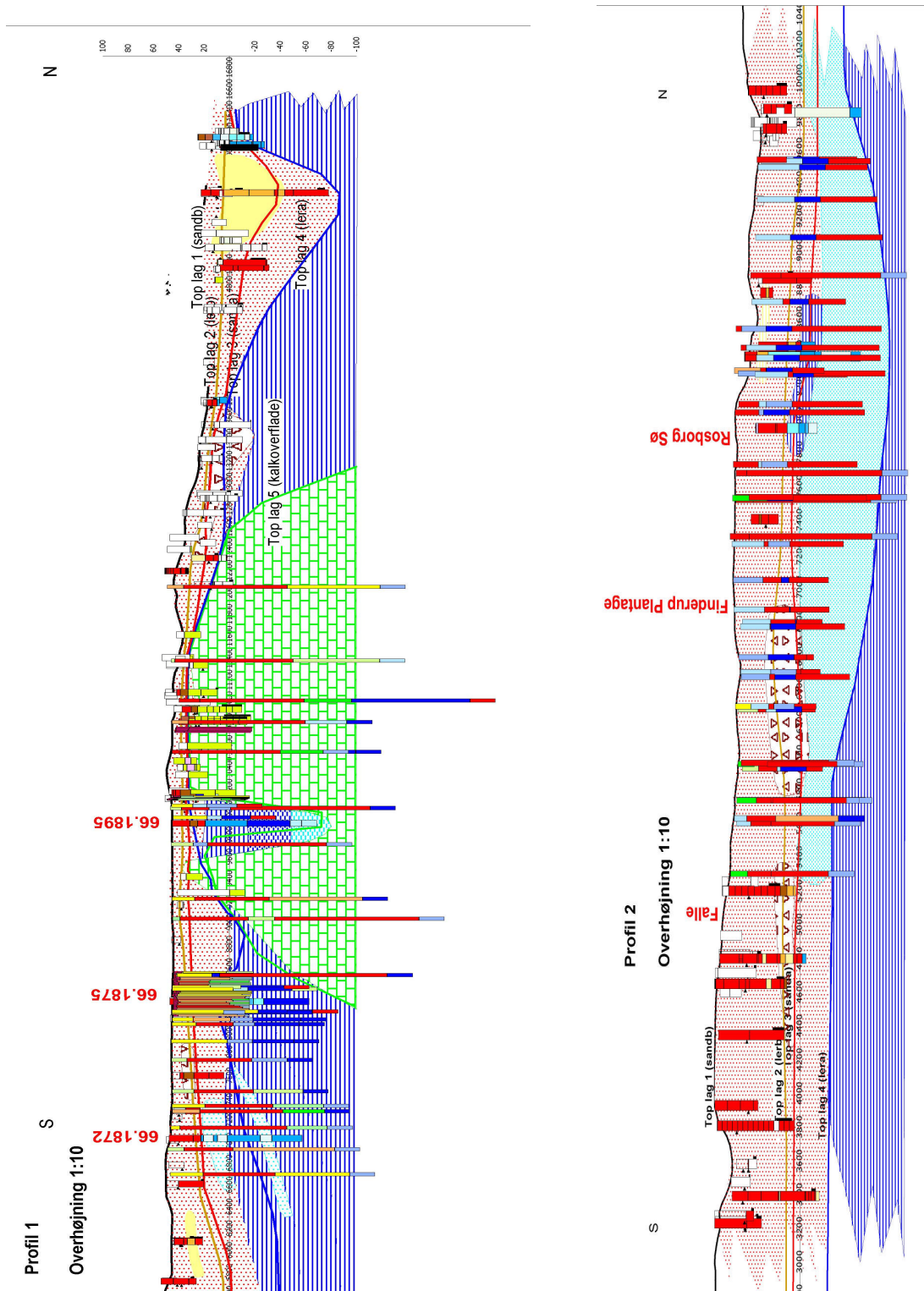
Lag 3 udgøres af miocænt kvartssand og moræne- og smeltevandssand. Det er kun i den østlige del af undersøgelsesområdet at der findes miocæne grundvandsmagasiner.

Lag 4 er et lækagelag mellem det øvre sekundære og nedre primære kvartære grundvandsmagasin bestående af moræne- eller smeltevandsler.

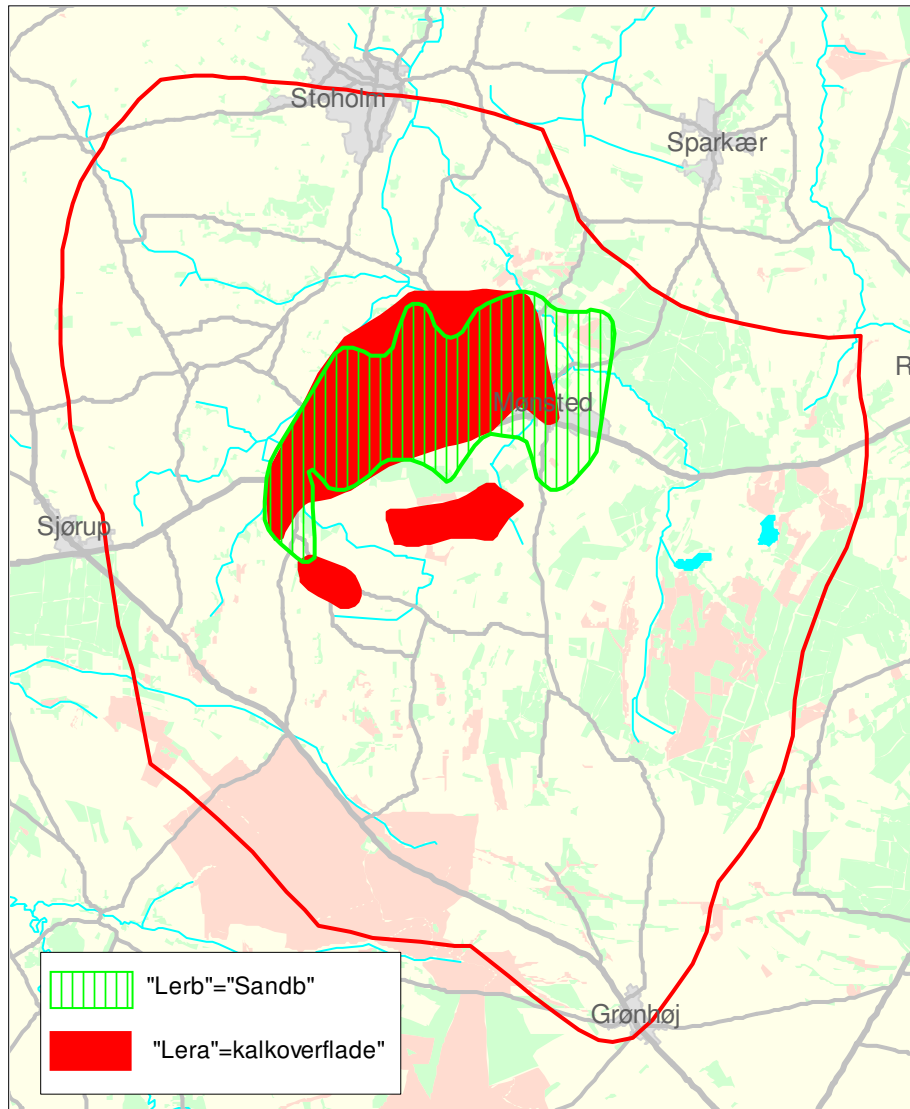
Lag 5 er et øvre sekundært kvartært grundvandsmagasin bestående af moræne- eller smeltevandssand.

Af profilerne på figur 6 ses de tolkede højdemodeller tegnet ind sammen med den tolkede geologiske model. På profil 1 ses, at der er områder hvor lag 2 (lækagelaget lerb), 3 (sanda) og 4 (lera) ikke eksisterer. Tilsvarende gælder for naboprofilerne i salthorstområdet. Men da der opereres med en lagkagemodel med gennemgående lag er alle lag i den hydrostratigrafiske model repræsenteret i hele modelområdet. Problemet med at laget reelt ikke eksisterer løses ved at tildele laget (i grundvandsmodellen) de samme hydrauliske egenskaber som det oven- eller underliggende lag. I de områder hvor laget reelt ikke eksisterer gøres laget så tyndt som muligt. Ved at gennemgå alle profilerne er de områder hvor lagene 2 og 4, reelt ikke eksisterer udpeget. Derved er der fremstillet 2 polygoner hvor lag 2 (lerb) i grundvandsmodellen skal zonerer som det overliggende lag 1 (sandb) og lag 4 (lera) skal zonerer som det underliggende lag 5 (kalk). Polygonerne ses på Figur 7.

Det betyder, at de 3 øverste lag som overlejrer Danienkalken i salthorstområdet tildeles hydrauliske egenskaber svarende til sand.



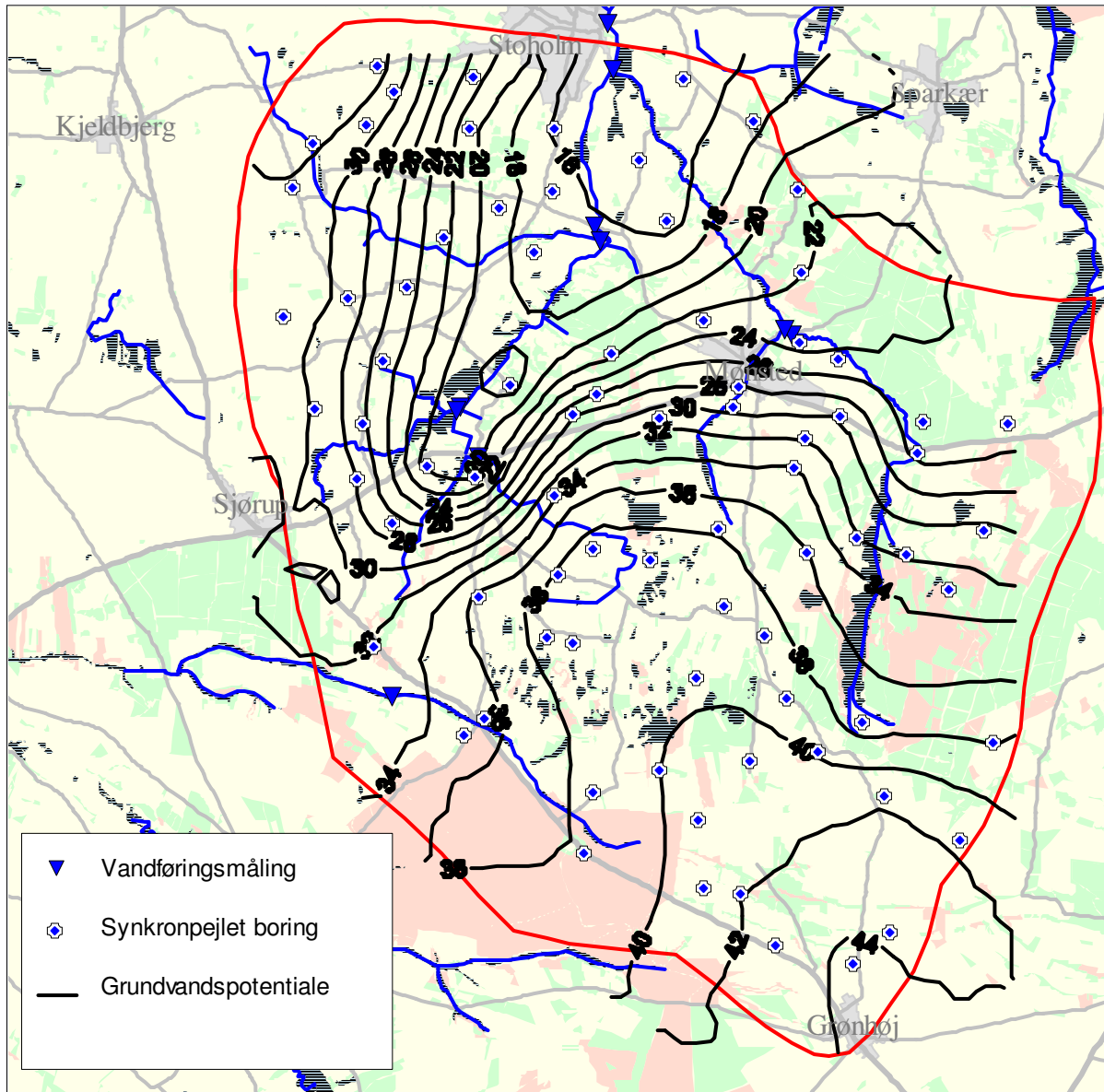
Figur 6. Geologiske profiler med tolkede højdemodeller.



Figur 7. Områder hvor geologiske lag skal zonerer som overliggende eller underliggende lag.

4.1 Grundvandspotentiale og vandløbsafstrømning

Som kalibreringsdata for den numeriske grundvandsmodel benyttes grundvandspotentiale og afstrømningsdata for vandløbene i modelområdet. Til konturering af det primære grundvandspotentiale er der lokaliseret og synkronpejlet 72 boringer. Tilsvarende er der foretaget 10 synkron vandføringsmålinger. Både synkronpejlingen af boringerne og de synkron vandføringsmålinger er foretaget den 11. august 2003. Det konturerede grundvandspotentiale og vandføringsmålingerne fremgår af Figur 8. Resultaterne findes ligeledes på vedlagte CD-rom.

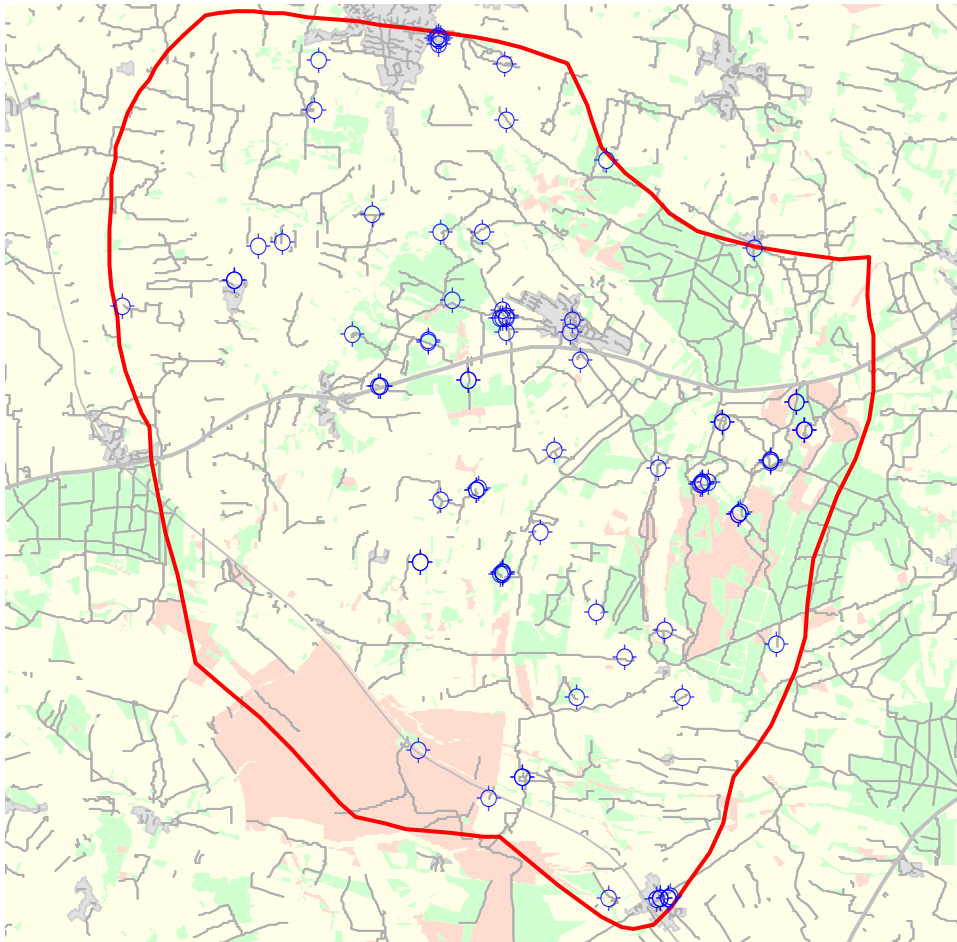


Figur 8. Grundvandspotentiale og vandføringsmålinger

4.2 Grundvandskemi

Der er lavet grundvandskemiske analyser i vandværksboringer, undersøgelsesboringerne og i enkelt anlæg (private indvindinger til f.eks. husholdninger). Kontinuerlige kemiske analyser i boringer i OSD findes for Mønsted og Daugbjerg Vandværker. Vandanalyser i undersøgelsesboringer ses i bilag 2.

Der er målt koncentrationer af ioner (i omfang svarende til boringskontrol), sporstoffer, miljøfremmede stoffer og pesticider. Desuden er der beregnet kemisk afhængige faktorer så som forvittringsindeks, ionbytning og vandtype. Boringer hvor der er lavet kemiske analyser er vist på figur 9.



Figur 9. Boringer hvor der er lavet vandanalyser.

4.3 Vandtype

Vandtypen er en beregnet faktor, fastlagt ud fra klassifikationen (Appendiks e) i Miljøstyrelsens zoneringsvejledning. Vandtypen kan benyttes til at få et overblik over vandets kvalitet og udvikling i vandkvalitet.

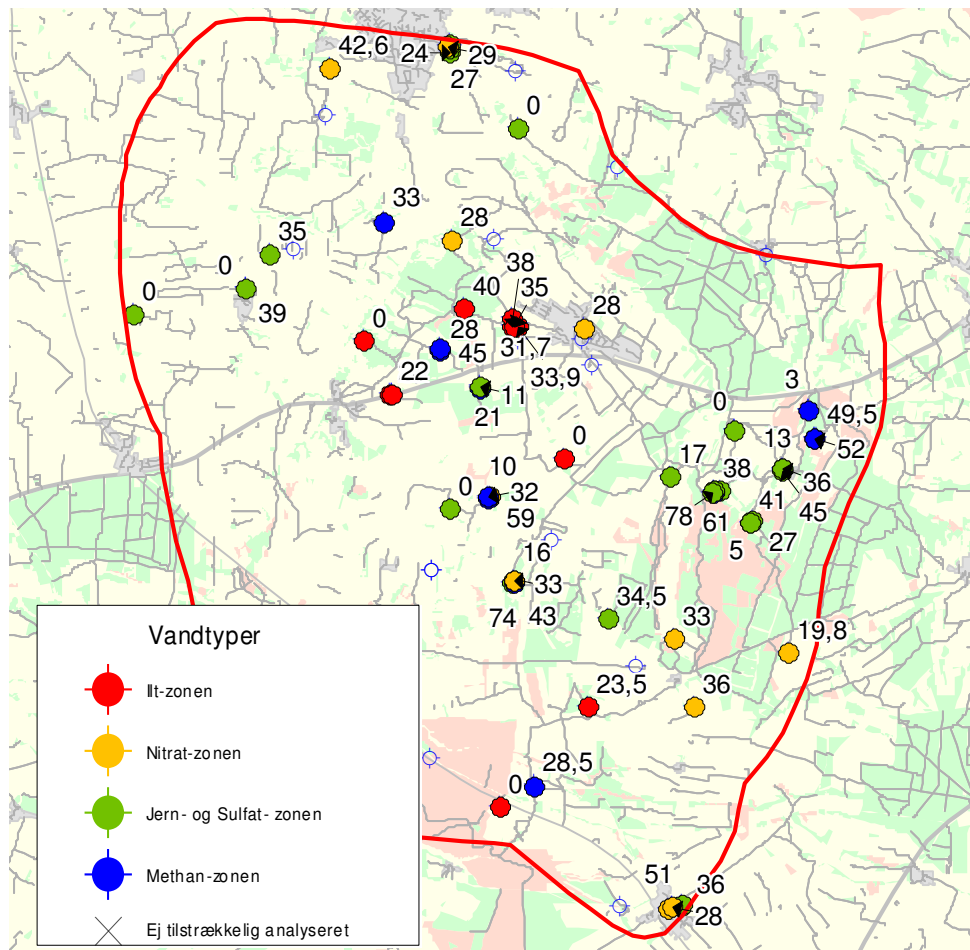
Vandtypen klassificeres i type A, B, C og D. Type A og B findes fra terræn og stopper ved nitratfronten, dvs. begge vandtyper indeholder nitrat (> 2 mg/l). Type A indeholder desuden ilt (> 2 mg/l). Type C og D findes dybt, og er kendetegnet ved at være nitratfattige, relativt gamle og ofte velbeskyttede vandtyper. Mellem vandtyperne A, B og vandtyperne C, D ligger nitratfronten. Mellem vandtype C og D ligger sulfatfronten.

Vandtypebestemmelsen ud fra analyser i boringer i området fremgår af Figur 10. I området ses den typiske lagdeling af vandtyperne hvor vandtype A og B er fundet i de øverste filtre, mens typerne C og D er fundet i dybere filtre. Centralt i OSD ses, at vandtypen i mange af boringer befinder sig i ilt- og nitratzonen (type A og B) til trods for at de er filtersat mellem 20 og 40 meter under grundvandspejlet. Dette tolkes som at nitratfronten i området er meget udviklet, og at nitratreduktionskapaciteten er begrænset.

Det kan i øvrigt bemærkes, at der i øvelsesterrænet ved Finderup, som dog ligger udenfor OSD, findes en række boringer, som er filtersat 5-50 meter under grundvandspejlet, der ligger i jern-

sulfat- og methanzonen (type C og D). Det kan skyldes, at nitratbelastningen fra øvelsesterrænet er meget lille, samtidig med at sedimentets reduktionskapaciteten her større her i forhold til i OSD.

I boring 66.1872 (undersøgelsesboring) ses den normale lagdeling af vandtyperne indtil det nederste filter, hvor vandtype C ligger under vandtype D. Sulfatkoncentrationen synes at adskille sig betydeligt i de to filtre, og da ionbalancerne stemmer, tolkes dette forhold som, at der er tale om særlige geologiske/kemiske forhold eller strømningsforhold omkring boringens nederste filtre.



Figur 10. Vandtypebestemmelse. Tallet angiver toppen filterdybde i meter under vandspejl. 0 angiver at filtertoppen ikke kendes.

4.4 Nitrat og nitratfronten

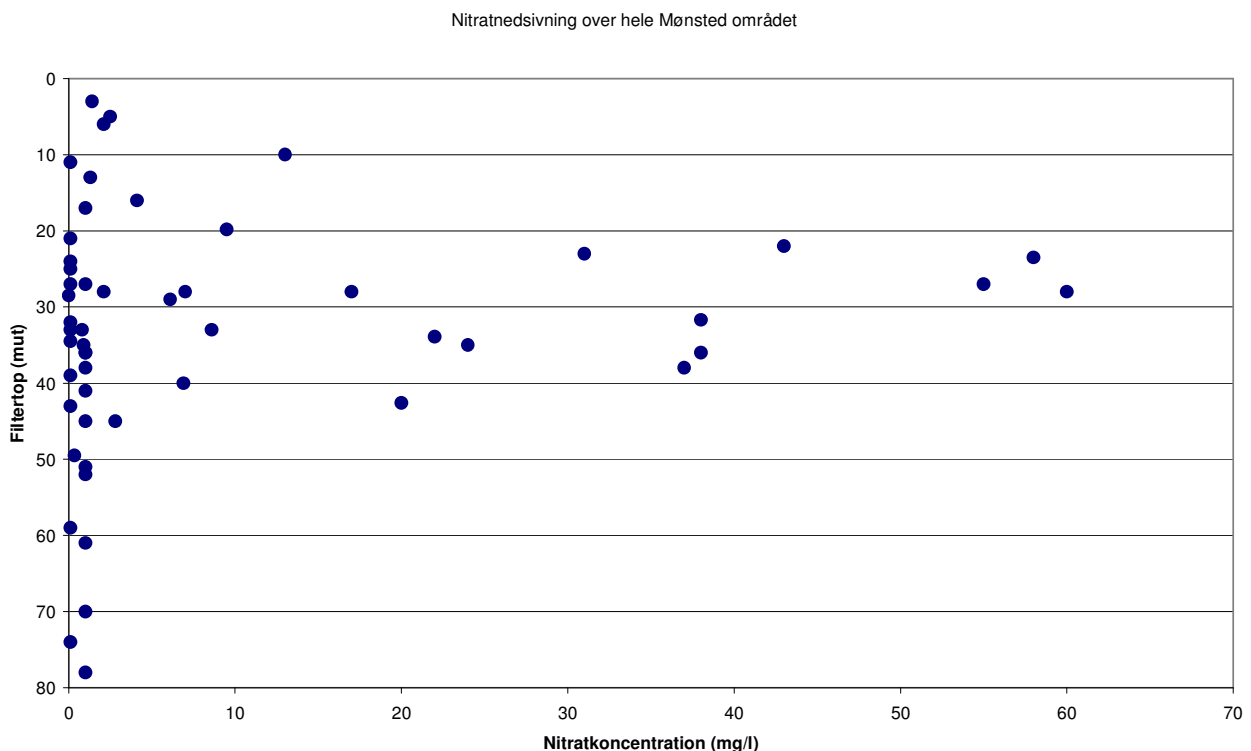
Nitratkoncentrationen over nitratfronten (i vandtype A og B) svinger meget. I ca. halvdelen af analyserne er nitratkoncentrationen over 25 mg/l, og i en fjerdedel af analyserne er grænseværdien overskredet med op til 30 % over grænseværdien.

Nitratfrontens placering bestemmes typisk vha. målte nitratkoncentrationer, samt farvebeskrivelser i borerapporter. Farvebeskrivelser af sedimentet kan benyttes, da sedimenter over nitratfronten kan være rødlige pga. at de er oxiderede, mens de reducerede sedimenter under nitratfronten er grålige.

I Mønsted området er der meget få borejournaler, der angiver en sikker placering af nitratfronten ud fra farveskift. Metoden kan ikke bruges i kalkboringer.

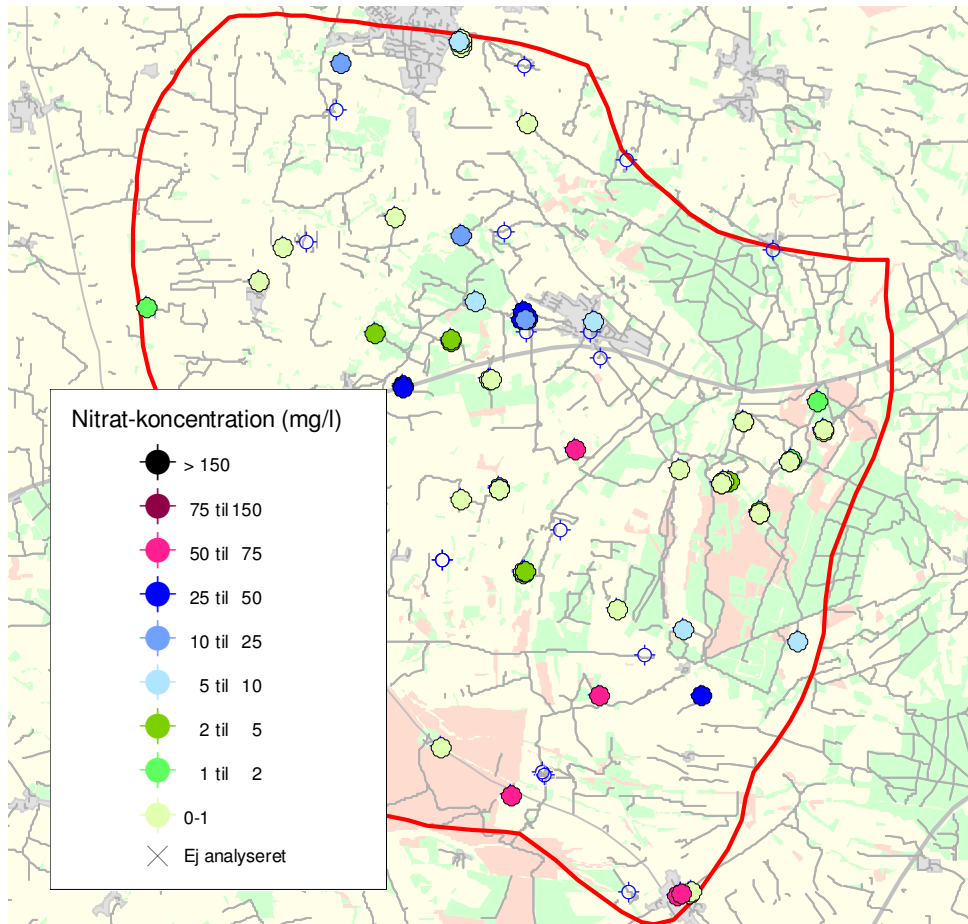
Ud fra undersøgelsesboringerne i området kan nitratfronten dog bestemmes idet der foreligger oplysninger om farveskift i sedimentet. For undersøgelsesboringerne 66.1872, 66.1875 og 66.1895 ligger nitratfronten hhv. 20, 20, og 9 mut.

Nitratfronten er desuden vurderet ud fra nitratanalyser fra boringer som er filtersat i forskellige dybder under terræn. For de analyserede boringer viser et plot af nitratkoncentration mod filtertop (i m.u.t.), at nitratfronten kan nå helt ned til 45 mut., se Figur 11. I en bestemt dybde kan der være stor variation af nitratkoncentrationer, hvilket antyder, at nitratfronten ikke har en fast placering i forhold til terrænet.



Figur 11. Nitratkoncentration i forhold til filterdybde under terræn.

Af Figur 12 ses målte nitratkoncentrationer i hele modelområdet. I enkelt anlæg (private indvindinger) er der lavet en nitratanalyse. Observationer i disse boringer viser, at nitratfronten kan ligge i meget forskellige dybder selv ved boringer tæt på hinanden. Det har ikke været muligt at finde et mønster i nitratfrontens udbredelse. Af figuren ses, at der generelt findes høje nitratkoncentrationer centralt i OSD. Dog findes der lave værdier (2-5 mg/l) i boringer som ligger i plantageområdet.



Figur 12. Målte nitratkoncentrationer i modelområdet.

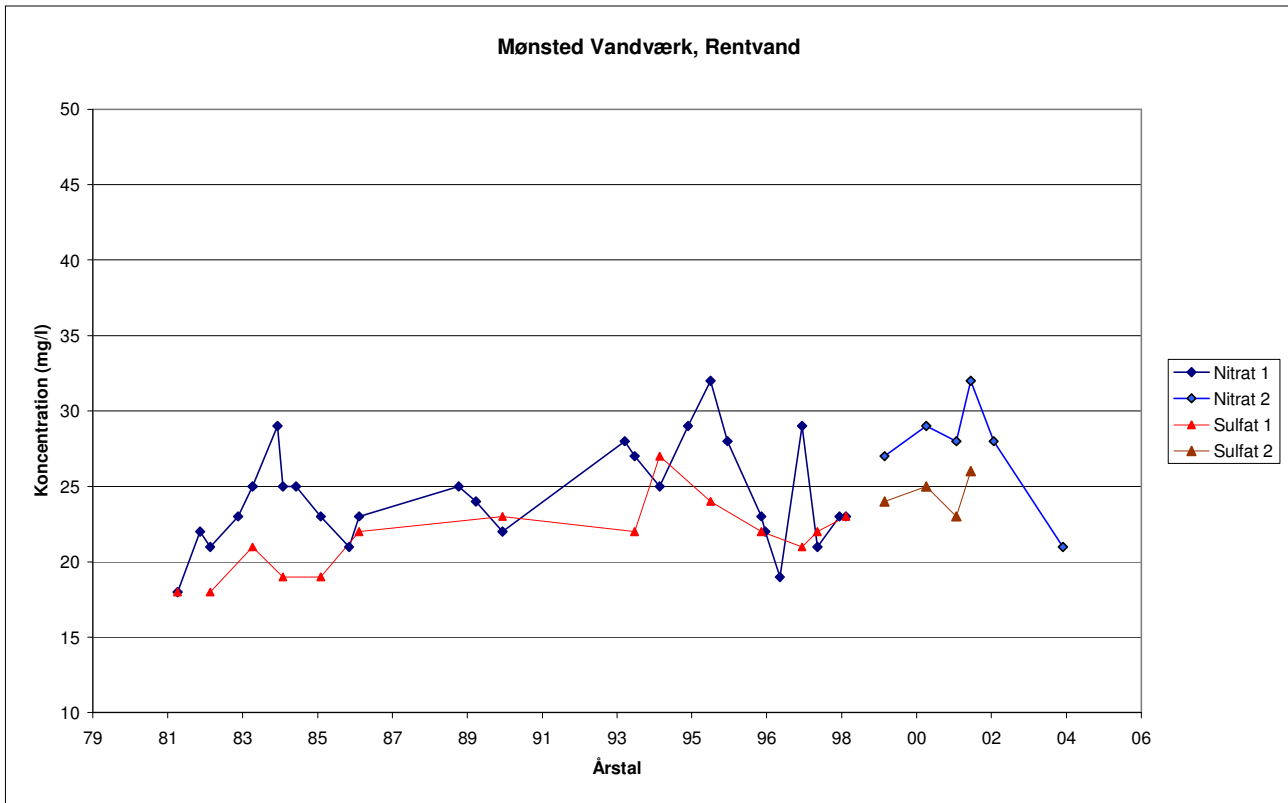
Konklusionen må være, at skal man undgå høje nitratkoncentrationer skal man i områder hvor de primære grundvandsmagasiner består af smeltevandssand/morænesand bore dybere end 45 m.u.t.. I den nordlige del af OSD hvor geologien er præget af sand og kalk, og hvor der er få eller ingen ler-dæklag er sedimenternes nitratreduktionskapacitet tvivlsom, men antageligvis lav. Det betyder, at man højst sandsynligt ikke kan "bore" sig ud af problemet med høje nitratkoncentrationer fordi der ikke er nogen nitratreduktionskapacitet tilbage i sedimenterne.

Af Figur 13 og Figur 14 og ses den tidlige udvikling af nitratindholdet for Mønsted og Daugbjerg Vandværker.

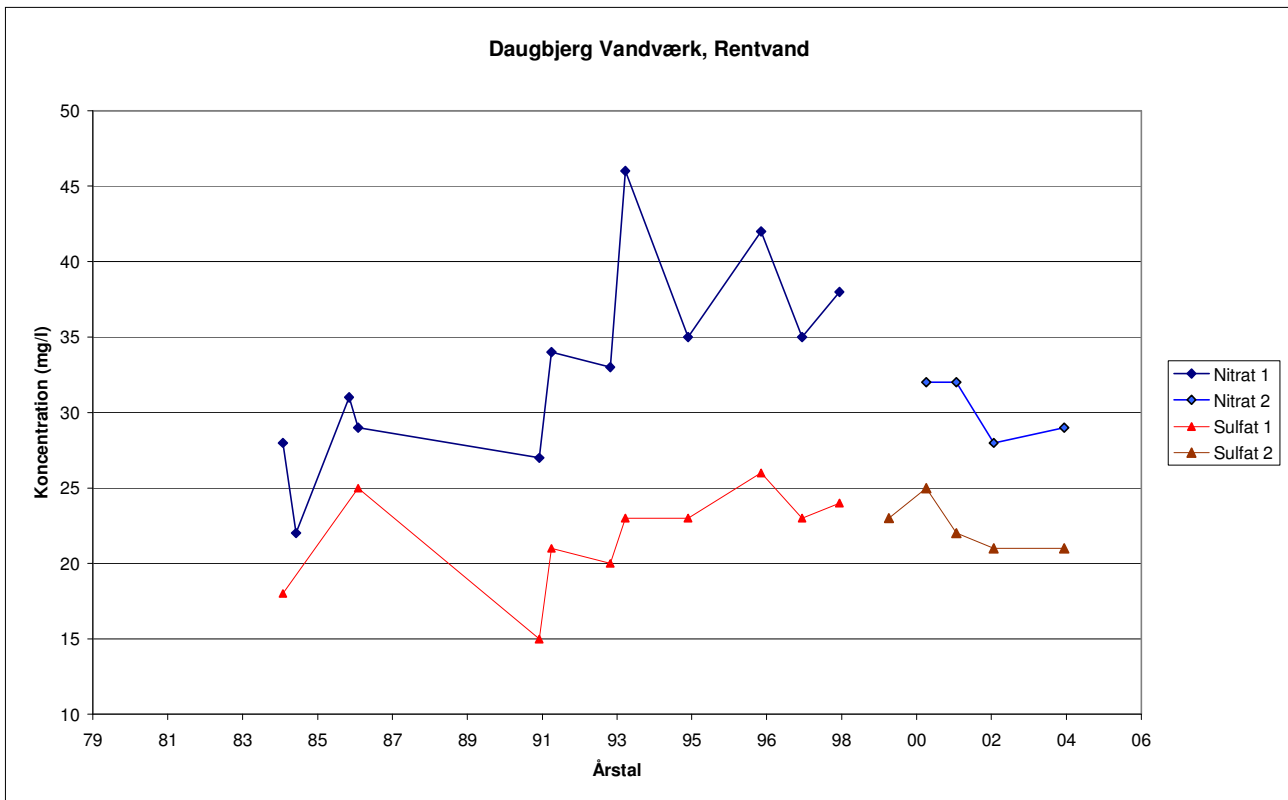
For Mønsted Vandværk viser analyserne, at nitrat var høj og stigende (fra 33 til 38 mg/l), mens sulfat var lav og faldende (20 til 23 mg/l). Det lave sulfatindhold sammenholdt med nitratkoncentrationerne antyder, at nitratreduktionskapaciteten fra pyrit er lav og evt. opbrugt. Desuden tyder de store ændringer på kort tid på at situationen er ustabil.

Daugbjerg Vandværk har to borer, 65.978 og 65.979, begge borer er filtersat i ca. samme niveau i samme kalkmagasin. I begge borer er nitrat forhøjet, og sulfat er lav og evt. stigende. Der er nogen forskel i nitratkoncentrationen i de to borer, det betyder, at de store udsving på rentvandskurven kan skyldes forskellige blandingsforhold mellem vand fra de to borer.

Efter 2000 blev prøverne analyseret af et andet laboratorium. Det er sandsynligt, at vandværket desuden har foretaget ændringer i driften omkring år 2000 eller at landbrugsdriften har ændret sig, som kan have bevirket, at nitratkoncentrationen er faldet, og både sulfat og nitrat synes at ligge på et nogenlunde stabilt niveau. Vandværkets tilstand er dog stadig meget kritisk.



Figur 13. Nitrat- og sulfatudvikling for Mønsted Vandværk.

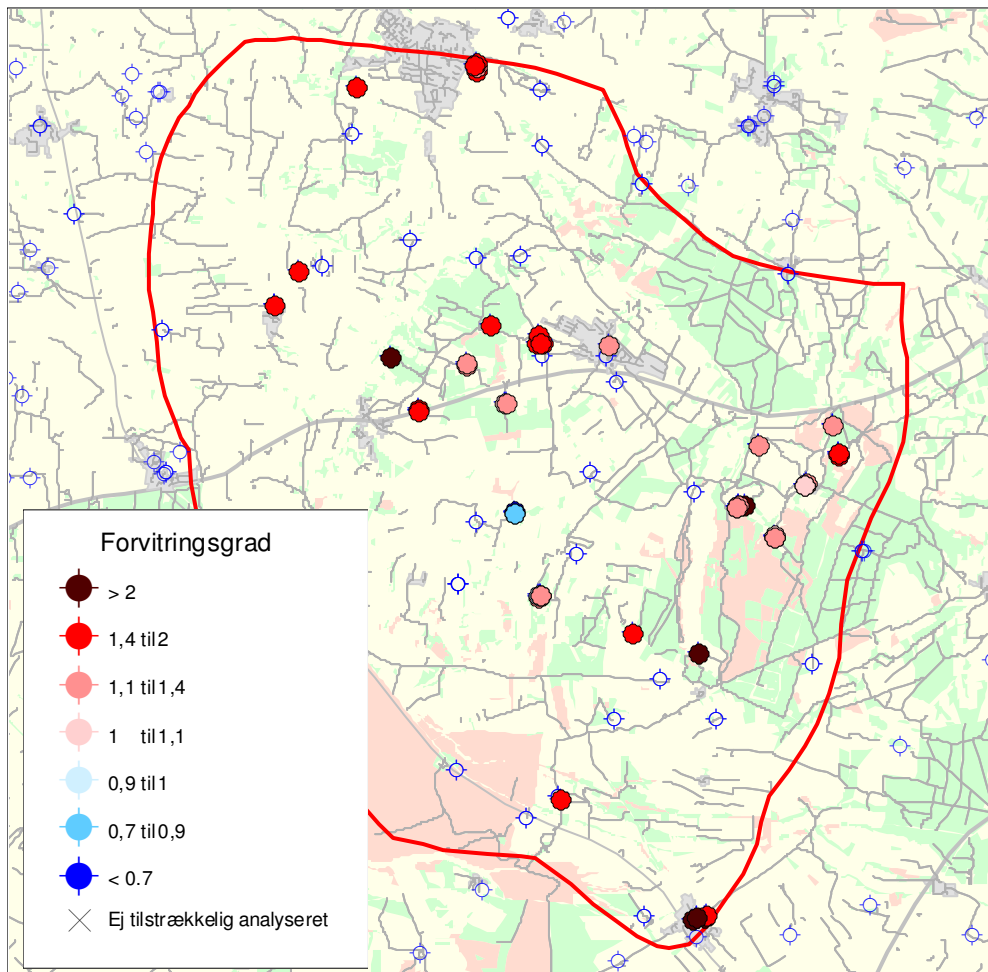


Figur 14. Nitrat- og sulfatudvikling for Daugbjerg Vandværk.

4.5 Nitratreduktion, ionbytning og forvittringsgrad

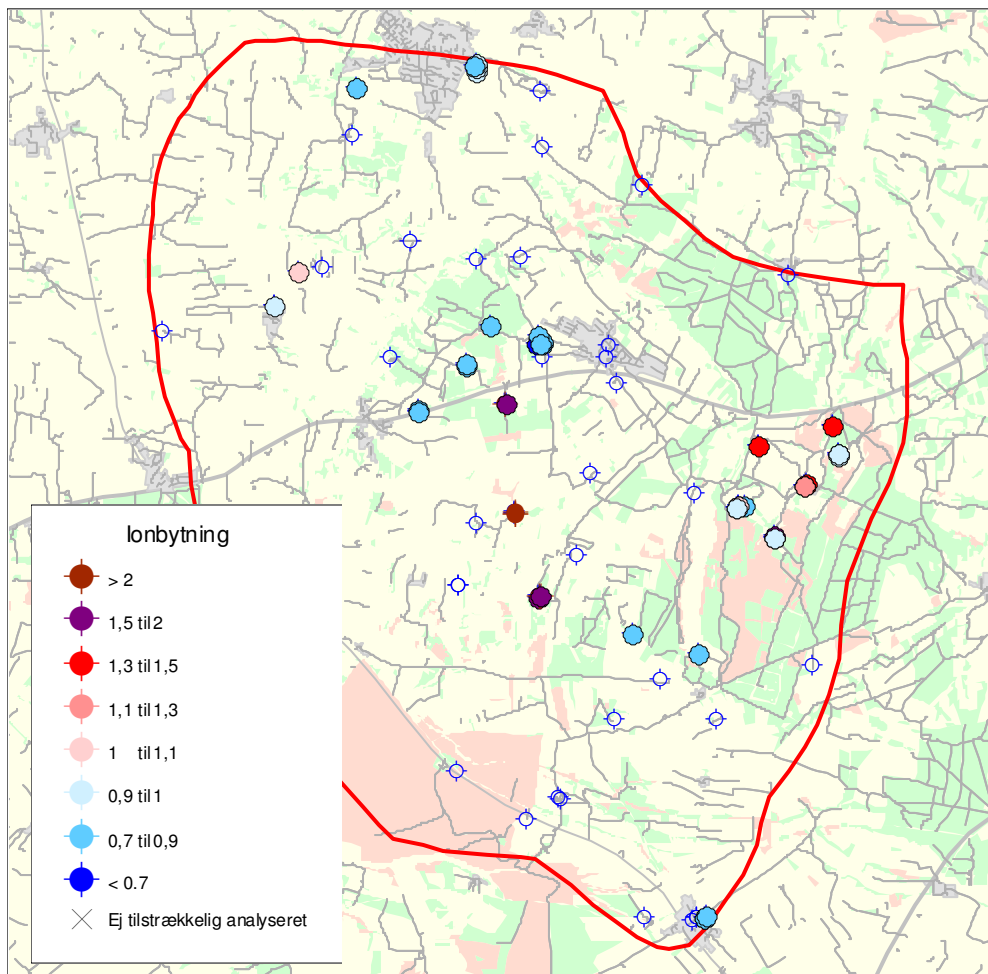
Ionbytning sker typisk i lerlag, og høj ionbytning antages derfor at være en indikator på, at der er lerdæklag i oplandet til boringen. Lerdæklag kan have en beskyttende effekt overfor nitratnedsivningen. Forvittringsgraden er en parameter, der angiver, hvilke processer, der ellers kan have fundet sted. Typisk falder høj forvittringsgrad sammen med at der sker betydelig oxidation af pyrit, og dermed reduktion af nitrat, i oplandet.

Generelt i OSD ses høj forvittringsgrad ($>1,4$) sammenfaldende med lav ionbytning. Det antyder som forventet ud fra geologien, at der er tynde eller ingen lerdæklag, og usikker naturlig beskyttelse mod nitratnedsivning. Se Figur 16.



Figur 15. Forvittringsgrad i analyserede borer.

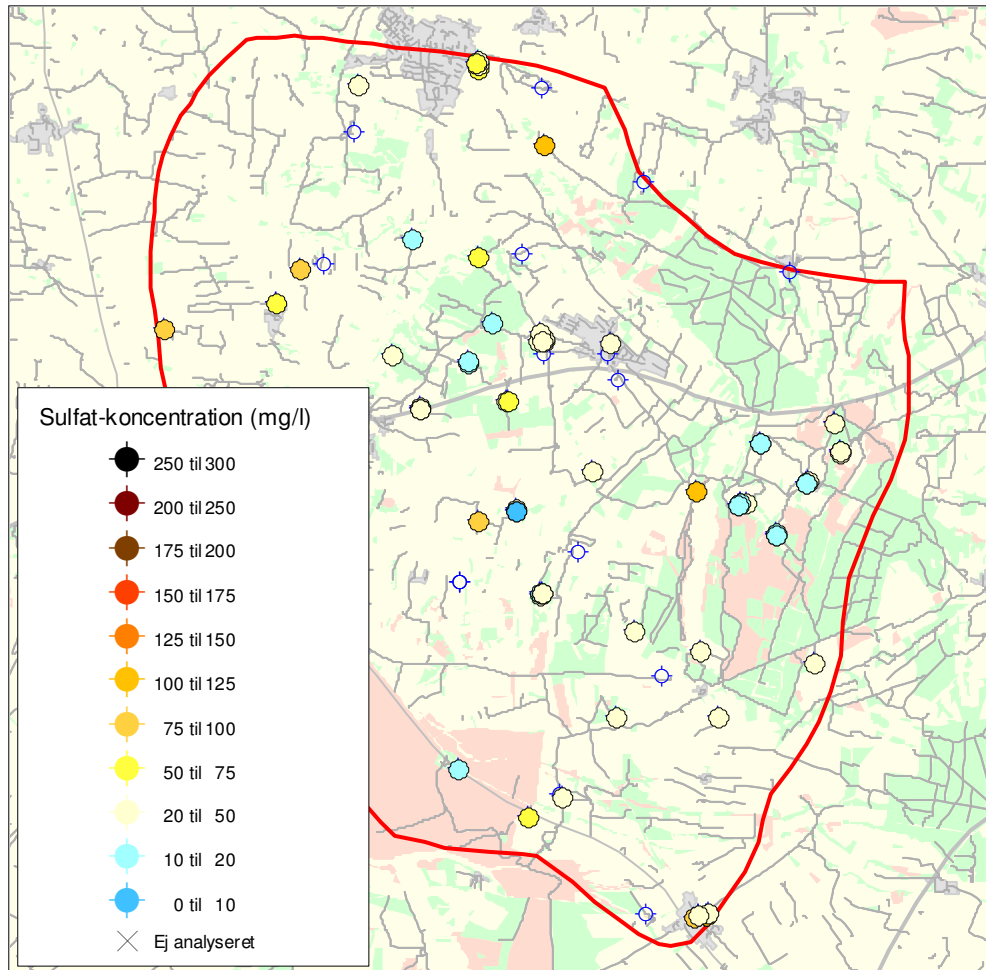
I OSD er ionbytningsgraden lav af samme årsag som nævnt for forvittringsgraden, se Figur 16. Ionbytningsgraden er relativt høj (>1) i et område sydøst for Mønsted og ved undersøgelsesboringerne, hvor der desuden er forvittringsgrader $< 1,4$. Det antyder, at beskyttelsen overfor nitrat her er god, hvilket stemmer overens med, at der er fundet lave koncentrationer af nitrat. Der er ikke observeret dækkende lerlag i oplandet til disse borer, hvor geologien overvejende består af smeltevandssand overlejret på tertiært kvartssand og glimmerler. Det kan betyde, at der i oplandet til borerne sker nogen ionbytning og nitratreduktion i sandlagene, evt. delvist forårsaget af de tynde lerlag i sandet. Det er dog også en mulighed, at nitratbelastningen ikke har været så høj her som andre steder i området.



Figur 16. Ionbytning i analyserede borer.

4.6 Sulfat

Baggrundsværdien for sulfat i området er ca. 20 mg/l. Sulfat koncentrationen i området overstiger ikke 120 mg/l (grænseværdien er 250 mg/l), og sulfat er derfor ikke en begrænsende faktor for vandindvindingen. Af Figur 17 ses borer hvor der er analyseret for sulfat. Sulfat er forhøjet i en stor del af analyserne. Det antyder, at der sker pyritoxidation med ilt eller nitrat. Det er ikke tegn på, at forhøjet sulfat skyldes residualt saltvand. I en del af borerne med højt nitratinhold er sulfatindholdet lavt, hvilket antyder, at pyrit er opbrugt i oplandet til disse borer. Desuden ses et par borer med højt sulfatindhold og kun lidt nitrat, disse borer er også nitratsårbare, da pyrit her kan være ved at være opbrugt. Det er meget sandsynligt, at nitratfronten vil blive ved med at udvikle sig, da pyritoxidation ikke synes at kunne følge med nitratbelastningen og derfor ikke har en tilstrækkeligt bremsende virkning på nedsivningen. De forhøjede sulfatindhold betyder, at der desuden bør være fokus på arsen og nikkel, som kan frigives ved pyritoxidation.



Figur 17. Boringer hvor der er analyseret for sulfat.

4.7 Arsen

Antallet af arsen analyser er meget begrænset i området (der er 26 analyser, hvilket svarer til, at der er analyseret for arsen i < 25 % af de foretagende vandanalyser). Grænseværdien for arsen, 5 µg/l, er overskredet betydeligt i 5 af analyserne, mens 7 analyser ligger over 1,5 µg/l.

I undersøgelsesboringerne (66.1872, 66.1875 og 66.1895), som er de eneste boringer med filtre i flere dybder, stiger arsen koncentrationen med dybden. Arsen koncentrationen er lavere i det nederste filter i boring 66.1872 end i det næstnederste filter, hvilket umiddelbart ikke passer med, at koncentrationen stiger med dybden. Vandtypebestemmelser viser dog, at vandet i det nederste filter er yngre end vandet i det næstnederste filter. Det tyder på, at der er komplicerede strømningsforhold, så det ikke er arsen koncentrationen der falder, men en helt anden vandmasse med et andet arsen indhold, der er analyseret. Særligt høje arsen koncentrationer (> 12 µg/l) er fundet i boring 66.1872 og 66.1895 i hhv. 43-45 m og 21-23 m. Det kan ikke generelt siges, at arsen er høj i dybden, da koncentrationen afhænger af lokale forhold.

Da koncentrationerne stedvist er meget høje, og arsen ikke kan afgrænses som et lokalt problem, kan arsen vise sig at være en begrænsende faktor for vandindvindingen i området, - særligt jo dybere der indvindes. Noget arsen kan dog fjernes ved vandbehandling.

4.8 Nikkel

Grænseværdien for nikkel er ikke overskredet i områdets analyser.

4.9 Saltvand

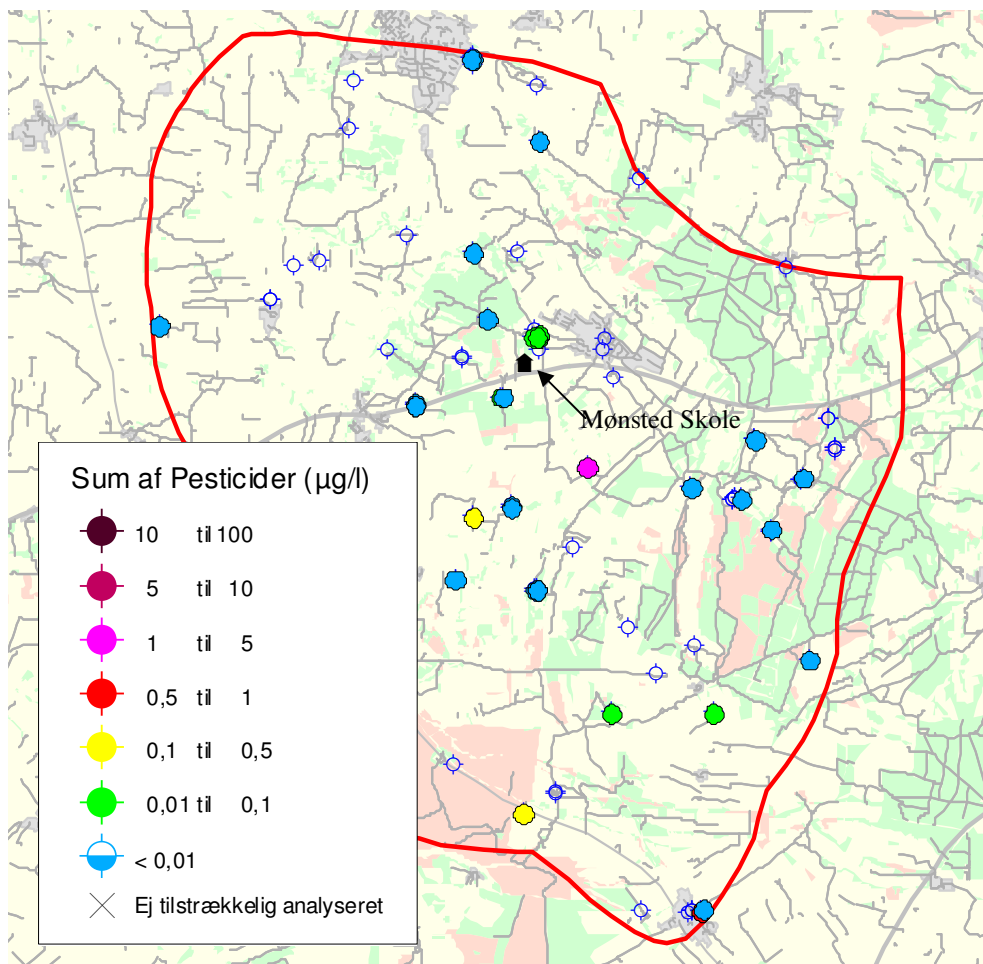
Saltvandspåvirkning observeres som forhøjet koncentration af klorid. Baggrundsværdien for klorid i Danmark er typisk 20-50 mg/l. Ud fra vandanalyser hvor der er analyseret for klorid kan det konstateres at der ikke er problemer med saltvand i OSD. Ved boreddybder større end 200 meter i den opskudte kalk i OSD må det der dog forventes at være residualt saltvand.

4.10 Pesticider

Der er fundet pesticidspor i 11 boringer i området. I 9 af disse boringer er det BAM, der er fundet.

Grænseværdien på 0,1 µg/l er overskredet i 4 boringer, se Figur 18.

Mønsted Vandværk har siden slutningen af 90'erne haft problemer med pesticidforurening af BAM. Forureningen stammer højst sandsynligt pesticidbrug fra Mønsted Skole som ligger umiddelbart opstrøms vandværkets indvindingsboringer, og hvor der er fundet en kraftig forurening med BAM. Pesticidforurening af grundvandet synes generelt at være af lokale karakter, og skyldes sandsynligt uforsvarlig brug af giftstoffer i nærheden af de forurenede brønde og boringer.



Figur 18. Sum af pesticidfund

5. Modelopstilling

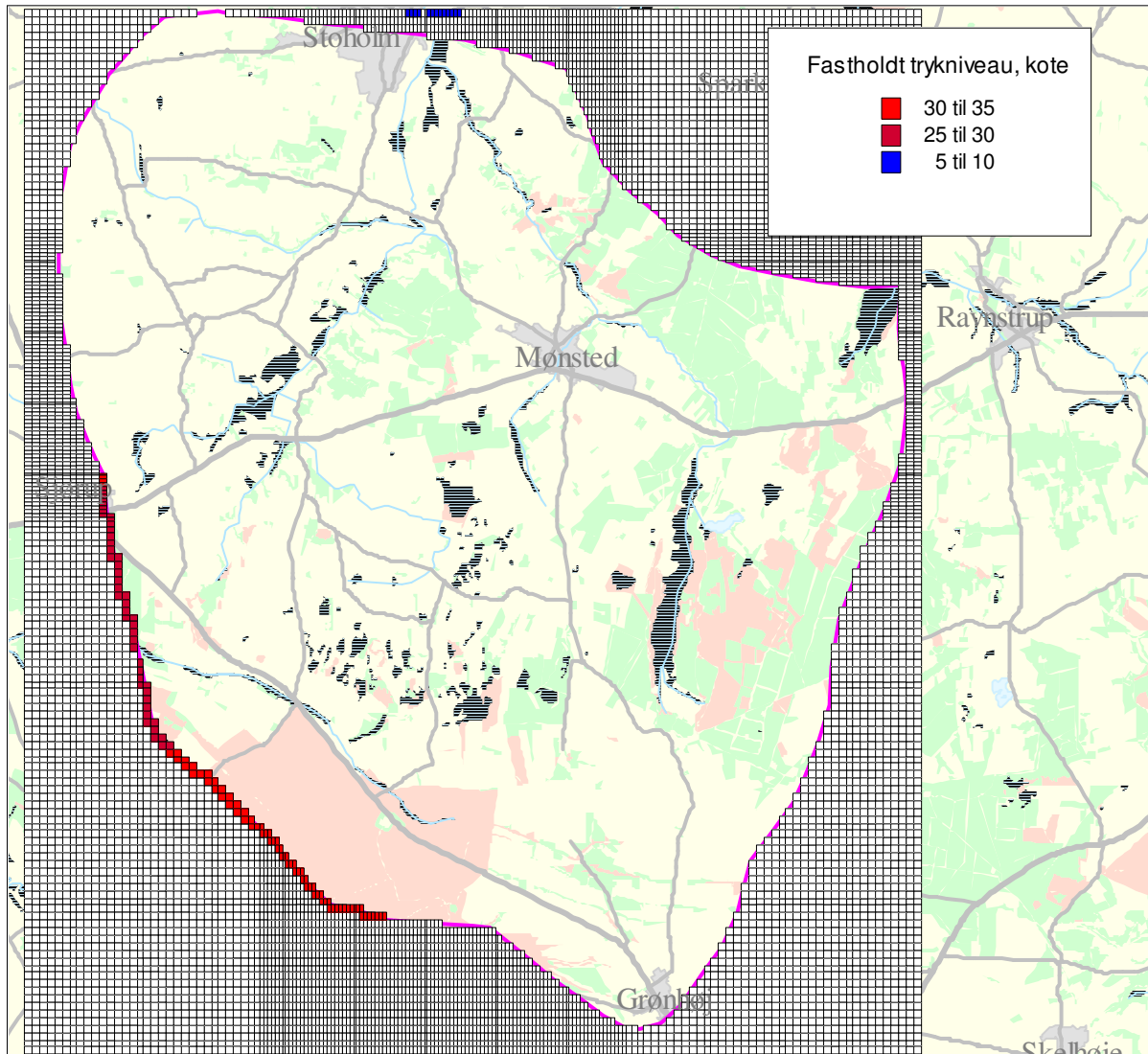
WaterTech A/S har opstillet den numeriske grundvandsmodel og indlæst data i den. Viborg Amt har leveret data til indlæsning i modellen. De leverede data fremgår af Tabel 2. Indlæsning og parametrisering af modellen fremgår af /2/. WaterTech A/S har ligeledes fremstillet et datasæt til validering af modellen. Boringerne til validering er udvalgt fra Viborg Amts GeoGIS database.

Data indlæst i grundvandsmodel
Modelafgrænsning med randbetingelser
3D geologisk model
Kote for vandløbsbund
Infiltrationsdata
Indvindingsdata
Beregnete T-værdier ud fra renpumpninger
Kalibreringsdata i form af synkronpejlede boringer og synkronvandføringsmålinger fra 2003

Tabel 2. Data indlæst i grundvandsmodellen.

5.1 Modelafgrænsning

Modelafgrænsningen fremgår af Figur 19. På baggrund af potentialekortet er modelområdet afgrænset, således at størsteparten af afgrænsningen følger grundvandsskel, hvor vandudvekslingen på tværs af randen kan antages forsvindende. Her benyttes nulflux rand. I sydvestlig retning mod Karup Å foregår der en betydelig grundvandsstrømning fra modelområdet. Her benyttes fastholdt trykrand i vandførende lag 1 og 3, således at strømmingen ud af området styres af det fastsatte potentiale. I ådalen med Mønsted Å på kanten af den nordlige rand ved Stoholm kan det ikke udelukkes, at der foregår en betydelig grundvandsstrømning parallelt med vandløbet ud af modelområdet. For at tage højde for denne strømning modelleres randen her i lag 1 og 3 med fastholdt tryk. I de lavpermeable lag 2, 4, 5 (randnært) og 6 antages den horisontale strømning at være negligerbar, hvorved der benyttes noflow på hele modelafgrænsningen. Med henblik på at gøre justeringen af grundvandsudstrømningen smidig i kalibreringen – specielt udstrømningen i ådalen – benyttes MODFLOW's General Head Boundary package (GHB) frem for Constant Head package (CH). Ud over det fastsatte trykniveau specificeres i GHB-package yderligere en strømningsmodstand (konduktans), der gør kalibreringen af grundvandsudstrømningen smidig ved justering af denne strømningsmodstand /2/.



Figur 19. Valg af ydre rande /2/

5.2 Randbetingelser

Af indre rande i grundvandsmodellen indgår:

- Vandløb
- Alle indvindinger større end 5.000 m³/år for perioden 1990-2003
- Infiltration

5.2.1 Vandløb

Vandløb som indgår i modellen fremgår af Figur 20 og bilag 3. I dele af amtsvandløb er der indmålt koter for vandløbsbundene. Det gælder for Mønsted Å, nord for Viborgvej, og opstrøms, indtil sammenløbet med Jordbro Å. På den strækning er der også indmålt vandspejlskote i vandløbet. I de resterende vandløb er vandløbsbundkoten aflæst fra et 4 cm-kort. Det gælder for Jordbro Å, Mønsted Bæk, Lånnum Bæk, Præstegårdsbækken, Søgårdsgrøften og Elkærgrøften.

Hydrografseparation af 3 vandføringsstationer viser, at af den totale gennemsnitlige afstrømning udgør grundvandsafstrømning (baseflow) 78-92 %. Over året udgør drænastrømningen derfor en

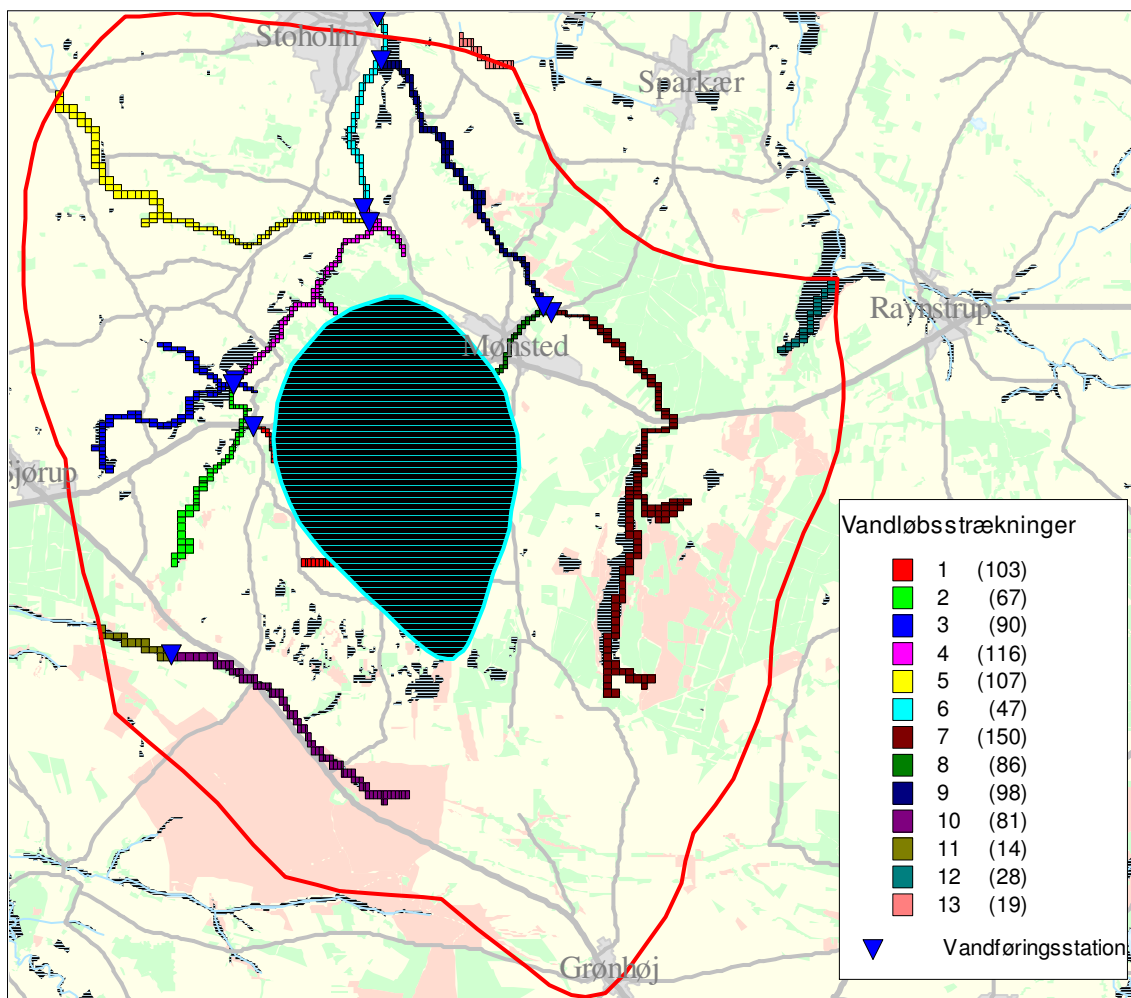
meget lille del af den samlede afstrømning – specielt i sommerhalvåret som modellen skal kalibreres for. Drænastrømningen simuleres derfor ikke i modellen. Afstrømningen i vandløbene modelleres udelukkende via MODFLOWs RIVER package.

Vandløbene er delt op i 13 strækninger på baggrund af placering af vandføringsstationerne (hvor der i 2003 er udført synkronvandføringsmålinger) og repræsenteres ved RIVER package.

For hver strækning er specificeret modellag, vandspejl og bundkote, og der foreligger én observation af vandføringstilvækst. Konduktansen for hver strækning betragtes som en fri parameter, der fastsættes i kalibreringen. Der er således opstillet 13 frie parametre. Som startværdi er for alle strækninger benyttet $5e-4$ m²/s, hvilket for en celle svarer til:

- et vandløb med en længde og bredde på 50 m henholdsvis 2 m
- tykkelsen af vandløbslækagelaget på 0,5 m med en hydraulisk ledningsevne på $2.5e-6$ m/s (tørvepakke).

Med opstillingen af RIVER-package er det vurderet, at udvekslingen med overfladerecipienter kan simuleres tilfredsstillende med grundvandsmodellen. Denne vurdering er understøttet af den udførte baseflow analyse af afstrømningen i modelområdet jf. ovenstående, som indikerer, at langt hovedparten af afstrømningen sker som grundvandsudsivning fra magasinerne /2/.



Figur 20. Inndeling af RIVER celler i strækninger på baggrund af vandføringsstationer.

5.2.2 Indvindinger

Alle indvindinger der i perioden 1990-2003 på et tidspunkt har indvundet mere end 5.000 m³/år indgår i modellen /2/. Tabel og kort med angivelse af indvindingerne fremgår af bilag 4.

Der er fremstillet 3 datasæt til henholdsvis kalibrering, validering og et scenarie:

- 2003 indvinding (kalibrering)
- gennemsnit 1990-2003 (validering)
- 1,25 x gennemsnit 1990-2003 (scenarie)

For hvert datasæt fremgår oplysninger omkring:

- boringsid
- x,y- placering
- filterlag
- mængde

For hver indvindingslokalitet er udtrykt årlig aktuel oppumpningsmængde for 1990-2003 samt tilknyttede boringer med informationer omkring placering, kote og filtersætning.

Indvindingsboringer tilknyttes det modellag, hvori midtpunktet af det pågældende filterinterval træffes. I den forbindelse sammenkædes indvindingsboringen med lagopbygningen i grundvandsmodellen ud fra nærmeste cellemidtpunkt i grundvandsmodellen. I tilfælde af indvinding i lækagelag (lag 2 og 4) eller lag 6 revurderes placeringen i modellag i det enkelte tilfælde til *nærmeste* vandførende lag, da tildeling af indvinding til et lækagelag ikke bør forekomme. Denne procedure til subjektivt at bestemme indvindingslag er at foretrække frem for metoden med at indlæse filterintervaller direkte i modelbrugerfladen, som så udelukkende bestemmer indvindingslag på baggrund af filterintervaller uden skelen til aquifer eller lækage egenskaber. I bilag 5 er vist 14 indvindingsboringer, hvor lagplaceringen er justeret.

I bilag 5 er ligeledes angivet en lokalitet, hvorfra der ikke foreligger boreoplysninger i GeoGis-databasen. For denne enkeltindvinding benyttes indvindingsplacering lig den placering, der er angivet for lokaliteten. Indvindingen tilknyttes det lag i grundvandsmodellen, der vurderes at blive pumpet fra i nærliggende boringer.

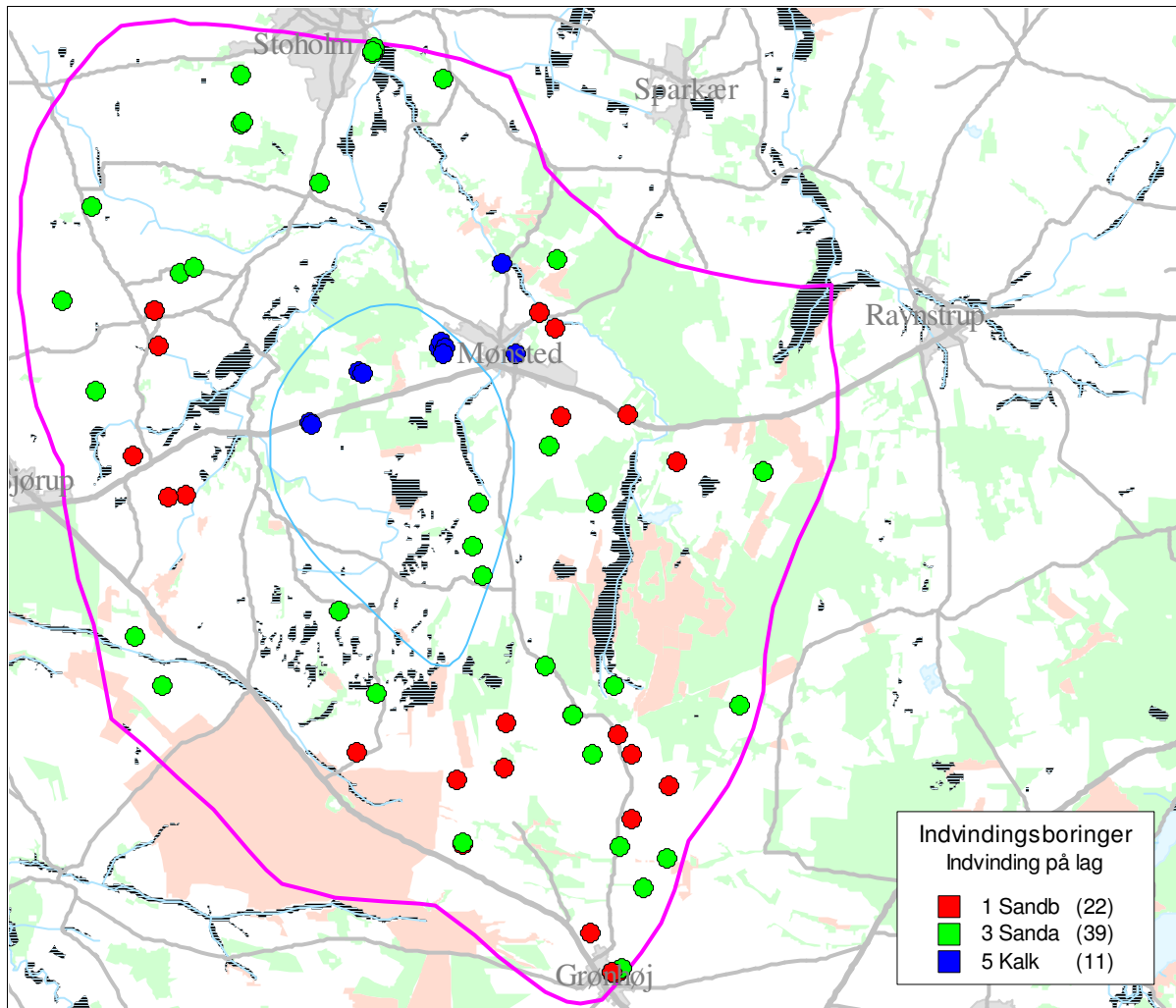
For boringer umiddelbart placeret i den nedre del af kalken (lag 6) justeres indvindingsplaceringen til udelukkende at foregå i den øverste del af kalken (lag 5), fordi sprækkeintensiteten og dermed indstrømningen til boringerne generelt er størst her.

Efterfølgende beregnes for hver indvindingslokalitet gennemsnit af oppumpningsmængde for 1990-2003 på baggrund af indberettede aktuelle mængder. På baggrund af databasens oplysninger omkring givne tilladelser vurderes for hver indvindingslokalitet om der har været oppumpning i hele perioden 1990-2003 eller ej. Denne vurdering er ikke helt trivial, da enkelte lokaliteter har indvundet udenfor perioder med tilladelse. Derfor erklæres en indvinding kun for inaktiv, hvis der ikke er registreret aktuel oppumpning i perioder uden tilladelse. Ellers tildeles lokaliteten en gennemsnitlig indvinding.

Der findes 55 indvindingslokaliteter i modelområdet med registreret indvinding større end 5000 m³/år på et tidspunkt i perioden 1990-2003. På bilag 4 ses placering af indvindingsboringer til hver indvindingslokalitet.

På Figur 21 er de enkelte boringer fordelt på modellag. Som det fremgår indvindes der kun fra kalken fra 4 indvindingslokaliteter i eller nær OSD, hvor kalken er opskudt på grund af salthorsten. På de resterende indvindingslokaliteter indvindes fra kvartære sandlag; sanda (lag 3) eller sandb (lag 1).

På bilag 4 er for alle 55 indvindingslokaliteter vist grafer over aktuelle og gennemsnitlige oppumpningsmængder for 1990-2003.



Figur 21. Indvindingsboringer fordelt på modellag.

Datagrundlaget for kalibreringen er lig indvinding anno 2003. Det er imidlertid ikke trivielt at vurdere gennemsnitsindvindingen til valideringen i de tilfælde, hvor en lokalitet ikke har været aktiv i hele perioden. I forbindelse med valideringen af grundvandsmodellen bør der være balance mellem indvunden mængde og den observation, der foreligger fra - eller tæt på - lokaliteten til det givne pejletidspunkt. I de tilfælde vurderes subjektivt for hver lokalitet om den gennemsnitlige indvinding skal indgå i valideringen ved sammenhold med valideringspejlinger. Hvis der ikke indgår en pejling til validering, fordi der indgår en pejling fra lokaliteten til kalibrering, medtages indvindingen kun, hvis der er indvundet i 2003. I bilag 6 er de indvindingslokaliteter, som ikke har været aktive gennem hele perioden 1990-2003 opgjort sammen med valg af medtagelse og argument herfor.

5.2.3 Infiltration

Hedeselskabet har beregnet infiltrationen for hele Viborg Amt /6/. Infiltrationen i modelområdet ses i bilag 7. Infiltrationen er beregnet for et 500x500 meter grid. Den benyttede infiltration i modellen er en reduceret infiltration svarende til 90% af middel for perioden 1989-2002, da modellen simulerer en sommersituation med reduceret infiltration. Til validering og scenarieberegninger er der ligeledes fremstillet datasæt for infiltrationen. Det er gjort for perioderne:

- Middel 1989-2002 (valideringsdatasæt)
- 12 måneders minimumsinfiltration, marts 1995-februar 1996
- 12 måneders maksimumsinfiltration, februar 1999-januar 2000

Som valideringsdatasæt er valgt middel 1989-2002 idet observationsboringerne som benyttes til validering også beskriver en middelsituation. 12 måneders minimum og maksimum er valgt til scenarieberegninger for at simulere ekstremesituationer. I forbindelse med beregning af indvindingsoplande kan det benyttes til at afgrænse den forventede maksimale og mindste udbredelse af indvindingsoplandet.

5.3 Zonering af hydrauliske ledningsevner

Som udgangspunkt til den hydrogeologiske parametrisering af vandførende lag foreligger et forholdsvist solidt grundlag af 103 prøvepumpningsobservationer af transmissivitet. Værdierne skal bruges som grundlag til udpegning af zoner med – antaget – konstante værdier af hydraulisk ledningsevne og som start zoneværdier i den følgende modelkalibrering.

Princippet i zoneringen på baggrund af T-værdierne er kortfattet:

- T-værdier henføres til modellag på baggrund af filteroplysninger
- K-værdier estimeres ved forholdet mellem T-værdier og lagtykkelsen i nærmeste celle-midtpunkt
- $\text{Log}_{10}(K)$ interpoleres til et 25x25 meter grid ved kriging og variogramanalyse
- Gridværdierne af $\text{Log}_{10}(K)$ overføres til modelnettet ved at beregne gennemsnittet indenfor modelcellerne
- Indenfor de vandførende lag udføres en grov zonering af hydraulisk ledningsevne i høj, mellem og lav værdi
- Startværdier af hydraulisk ledningsevne beregnes på baggrund af gennemsnit af målte værdier indenfor zonerne

I områder hvor de hydrogeologiske lavpermeable enheder (lag 2 og 4) reelt ikke eksisterer (fastsat til minimumstykkelse < 1 meter) fastsættes tykkelsen til 1 m, mens zoneparameteren ændres til:

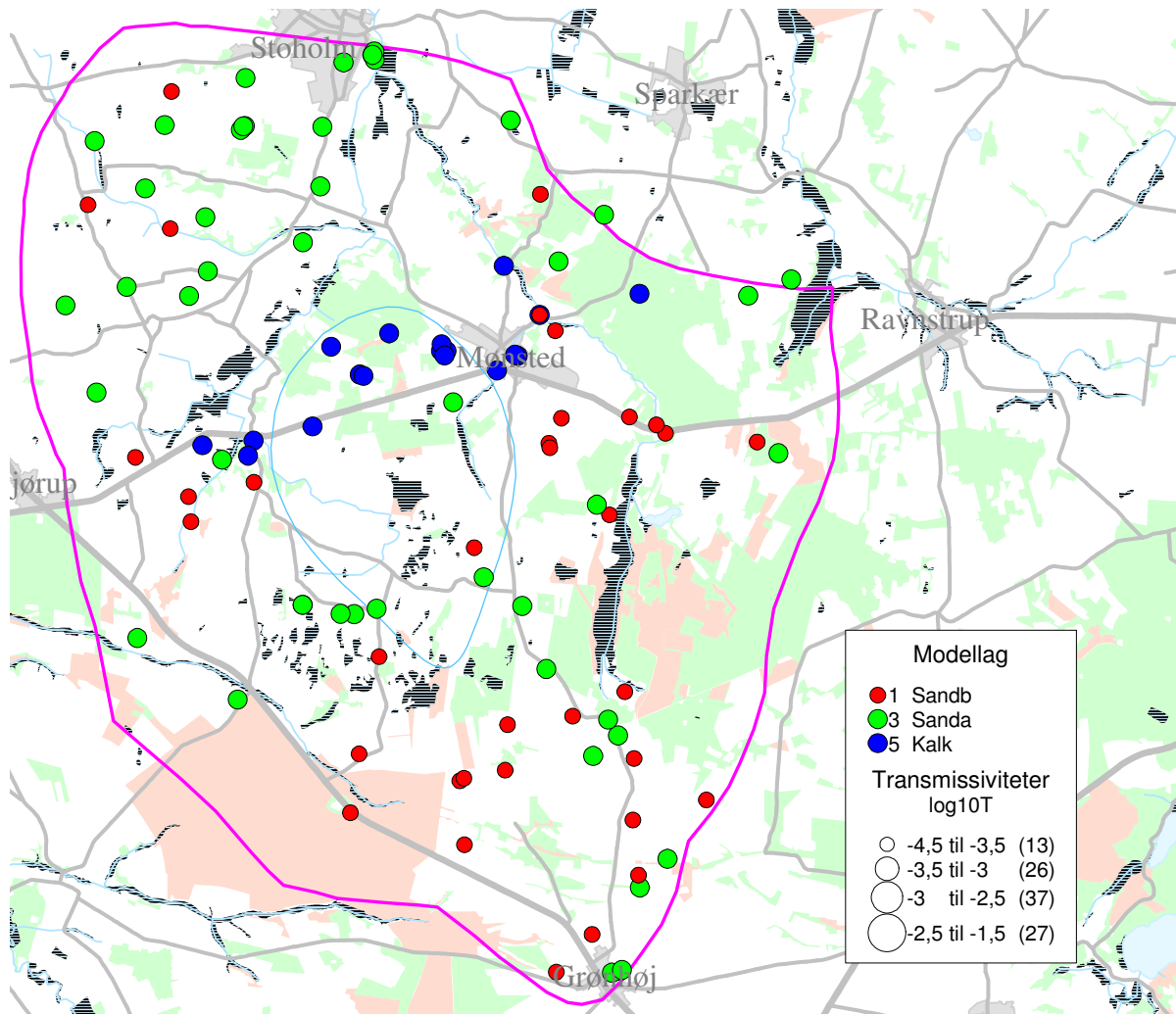
- Lag 2: Zone i lag 3
- Lag 4: Zone i lag 5

Viborg Amt har yderligere ønsket ændret lagzonering i området dækket af 2 udleverede polygoner:

- Polygon lerb: Zonering lig overliggende sandb
- Polygon lera: Zonering lig underliggende kalk

På baggrund af oplysninger omkring filtersætning er de enkelte prøvepumpningsresultater henført til modellag ud fra midtpunkt af filterinterval. På Figur 22 er angivet $\log_{10}(T)$ med angivelse af modellag.

Det ses, at der foreligger 18 målinger af T i den opskudte kalk i den centrale del af området, mens der findes hele 48 observationer af T i lag 3 og 37 observationer i lag 1. De største T-værdier på over $10^{-2,5}$ m²/s, svarende til 0,0031 m²/s, er målt ved Mønsted og Stoholm Vandværk.



Figur 22 Transmissiviter (log₁₀) fordelt på modellag

På baggrund af kortene er der for lag 3 og 5 udført en grov zonerings af hydraulisk ledningsevne i områder med høje, mellem og lave værdier. I bilag 8 er angivet histogram for $\log_{10}(K)$ og gennemsnit (K) af målte K-værdier indenfor zonerne i lag 1, 3 og 5. Gennemsnittene vil blive brugt som startværdier af de horisontale ledningsevner i modelkalibreringen. De vertikale ledningsevner sættes til 10 % af de horisontale som start.

Efter den hydrogeologiske parametrisering foreligger 10 zoner af hydraulisk ledningsevne. På bilag 9 er vist zoneringsen i alle modellag. I Tabel 3 er angivet en oversigt over benyttede zonenumber.

#	Lag	Hydrogeologisk enhed	Startværdi – Kx [m/s]
1	1	Sandb	7.8e-5
2	2	Lerb	1.0e-7
3	3	Sanda	5.6e-5
4	4	Lera	1.0e-8
5	5	Øvre kalk – OSD	2.7e-4
6	5, 6	Øvre kalk (ej OSD og nedre kalk)	1e-7
7	5	Øvre kalk – OSD	3.2e-5
8	5	Øvre kalk – OSD	3.6e-6
9	3	Sanda	1.7e-4
10	3	Sanda	1.1e-5

Tabel 3. Zoner af hydraulisk ledningsevne med angivelse af lag, id og startværdi. Med fed er angivet værdier, der er estimeret på baggrund af målte T-værdier.

6. Kalibrering

Som omtalt i afsnit 1.2 Modelnøjagtighed så er målet, at grundvandsmodellen kalibreres således, at den opfylder "high fidelity" kriterierne ifølge /1/. Kravene er udregnet i appendiks B efter /1/ og listet herunder

Krav 1: $ME \leq 1,49$ meter

Krav 2: $RMS \leq 1,65 \cdot s_{obs}$

Lag	RMS \leq	
	Kalibreringsdata [m]	Valideringsdata [m]
1	2,48	3,30
3	2,48	3,30
5	2,48	3,30

Krav 3: $RMS \leq 1,49$ meter

Krav 4: $SE \leq 1,65$ meter (Gælder for den inverse kalibrering for både potentialer og vandføring)

Udover ovennævnte nøjagtighedskrav er det endvidere et krav, at den absolutte afvigelse mellem det simulerede og observerede potentiale, MAE, er tæt på nul. Endvidere skal det simulerede strømningsbillede også på tilfredsstillende vis ligne det observerede. Af bilag 10 fremgår tildelte usikkerheder på de enkelte targets.

6.1 Parameterbånd

Inden kalibrering af modellen startes opstilles der intervaller for de forskellige bjergarter i modelområdet indenfor hvilke det vurderes, at de realistiske hydrauliske ledningsevner findes. Parameterbåndene bestemmes for de respektive vandførende lag som er lag 1 (sand), 3 (sand) og 5 (kalk). Der er enkelte målte hydrauliske ledningsevner indenfor de enkelte lag hvor bjergartstypen er en anden end angivet for det respektive lag. Grunden dertil er, at borerne ligger tæt på det område hvor kalken er domet op. I forbindelse med konturering af lagoverfladerne betyder det, at enkelte borer som er filtersat i f.eks. sand i lag 3 kan blive henført til lag 5 som er et kalklag. Det sker bl.a. fordi, at lag 4, som er tertiært ler, ikke eksisterer i området hvor kalken er domet op. Det gælder for 5 borer i modelområdet. For at kunne relatere den hydrauliske ledningsevne til en bjergart er de 5 borer i beregningen af parameterbåndene medtaget under den bjergart der angives som indvindingsbjergarten. De hydrauliske parametre er bestemt ud fra renpumpningsdata fra modelområdet. I bilag 11 ses de hydrauliske ledningsevner der indgår i beregningerne for de respektive vandførende lag. I nedenstående Tabel 4 ses middel, minimums- og maksimumsværdier for de respektive lag og bjergarter.

Parameterbåndene benyttes bl.a. i den inverse kalibrering hvor der skal angives et interval indenfor hvilken den hydrauliske ledningsevne må ligge.

Af Tabel 4 ses en meget lav minimumsværdi for kalk. Det kan skyldes, at der indvindes fra skrivekridt, som kan have en lav hydraulisk ledningsevne. Endelig skal det bemærkes, at de hydrauliske

parametre er beregnet ud fra renpumpningsdata foretaget i forbindelse med etablering af borerne hvorfor der er nogen usikkerhed på data.

Lag/bjergart	Minimumsværdi [m/s]	Maksimumsværdi [m/s]	Middelværdi [m/s]
1/sand	4,30e-6	6,00e-4	1,30e-4
2/ler (lækagelag)	1,00e-8	1,00e-6	1,00e-7
3/sand	1,20e-6	3,60e-4	9,10e-5
4/tertiært ler *	1,00e-7	1,00e-9	1,00e-8
5/kalk *	1,20e-6	1,20e-3	1,30e-4
6, dybtliggende kalk *	1,00e-8	1,00e-6	1,00e-7

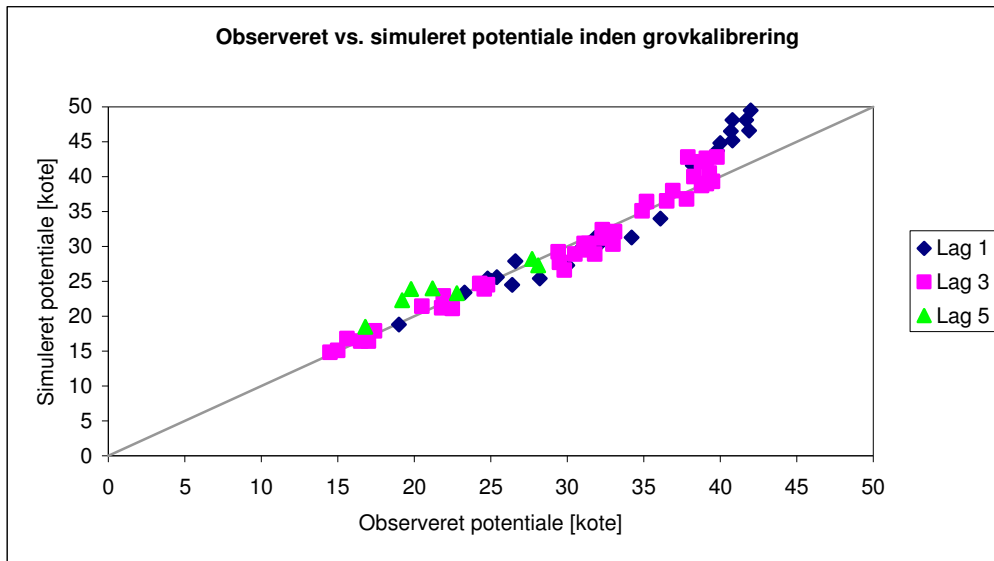
Tabel 4. Parameterbånd for hydraulisk ledningsevne. * Erfaringsbaserede værdier

6.2 Kalibreringsjournal

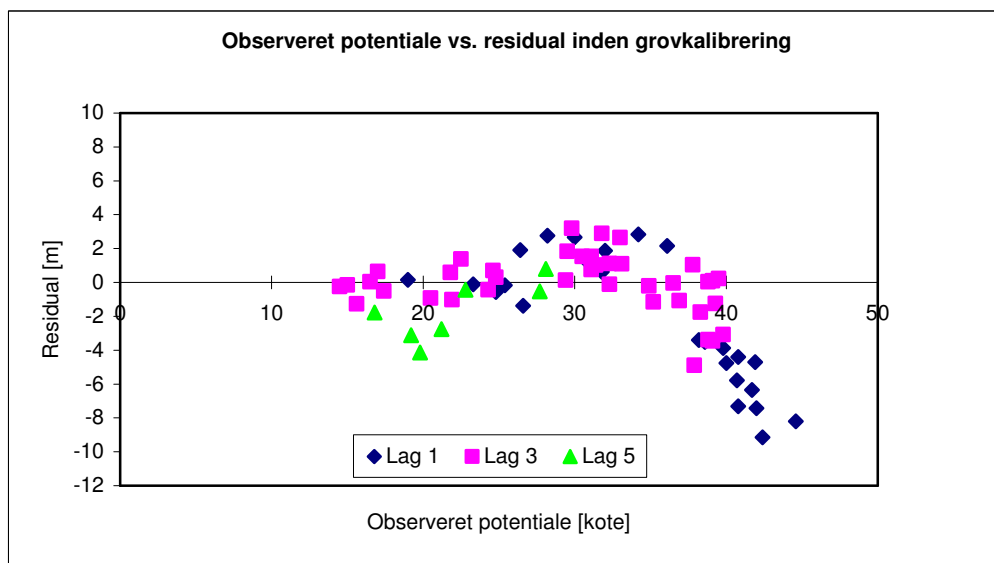
Modellen er kalibreret i 3 i trin, hvor zoneringsen af modellen gøres mere og mere detaljeret. For ikke at overparametrisere modellen så er der en øvre grænse på 12 zoner i modellen. I initialmodellen er der 10 zoner. Zonerne er beregnet som beskrevet i afsnit 5.3 Zoneringsen af hydrauliske ledningsevner. I mellem hvert trin er der udført invers kalibrering med MODFLOW2000. Der er også foretaget en følsomhedsanalyse for at udpege parametre i modellen der giver anledning til store ændringer i potentialet eller vandløbsafstrømningen. Inden den inverse kalibrering startes foretages der en manuel grovkalibrering af modellen.

6.2.1 Indledende grovkalibrering

Ved den første modelkørsel observeres der overestimerede potentialer i den sydlige del af modellen i lag 1 og 3. Det betyder, at en lavning i modelområdet (Hjordtal) oversvømmes. For at sænke potentialet i den sydlige del af modellen er der lagt en ekstra zone (11) ind i lag 1 med en højere hydraulisk ledningsevne. Det begrundes med at de dilluviale sandlag i den sydlige del af modelområdet kan antages at være grove, idet der under sidste istid umiddelbart sydøst for modelområdet befandt sig en gletscherport ved Skelhøje. I det øvrige modelområde er der i lag 1, 3 og 5 generelt simuleret for høje potentialer. I lag 3 er der en række mindre zoner som er zoneret om til omgivende større zoner, i det de små zoner ikke får betydning for kalibreringen af modellen. Der er udført en følsomhedsanalyse som viser, at den hydrauliske ledningsevne K_{x1} fra zone 1 er en meget følsom parameter. Det skyldes, at der er mange observationsboringer i lag 1 som udgøres af zone 1. De simulerede vandføringer er generelt for høje. For at mindske afstrømningen er konduktansen for vandløbsbundene sænket. Kun for to vandløbsstrækninger simuleres der for lave afstrømninger. Der er konduktansen øget. Ved reduktion af vandføringerne bliver potentialer overestimeret. For at sænke potentialerne igen er konduktansen for de to general head boundarys øget. Usikkerhedsvurderinger for vandføringer fremgår af appendiks A. Af tabellerne 5 og 6, samt figurerne 7-10 fremgår statistikkerne for afstrømningerne og borerne for hhv. før og efter grovkalibrering.

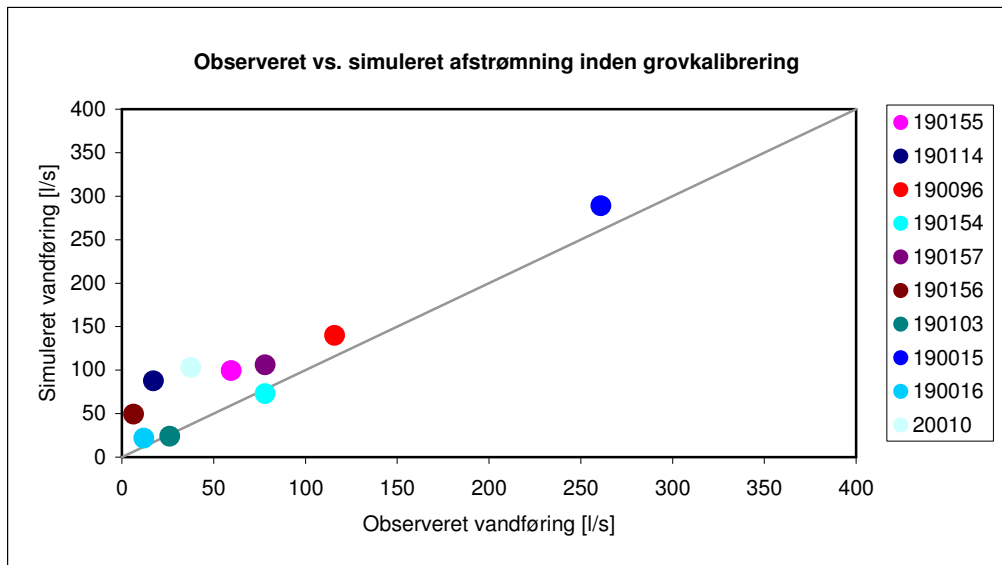


Figur 23. Observeret vs. simuleret potentiale inden grovkalibrering



Figur 24. Observeret vs. simuleret potentiale inden grovkalibrering

Af Figur 23 og Figur 24 ses, at de høje potentialerne generelt er overestimeret i lag 1 og 3. De højest potentialer findes i den sydlige del af modelområdet. Det ses ligeledes af Figur 23 og Figur 24, samt Tabel 5 (negativ værdi angiver en overestimering af potentialet), at potentialerne i lag 5 (kalken) generelt er overestimeret. For vandføringerne gælder, at de generelt er overestimeret. Af Tabel 5 ses at der potentialerne globalt for modellen er overestimeret. Det sammenholdt med at vandføringerne generelt også er overestimeret antyder, at infiltrationen for modellen er for høj, idet en mindskelse af vandføringerne vil medføre et endnu højere potentiale.

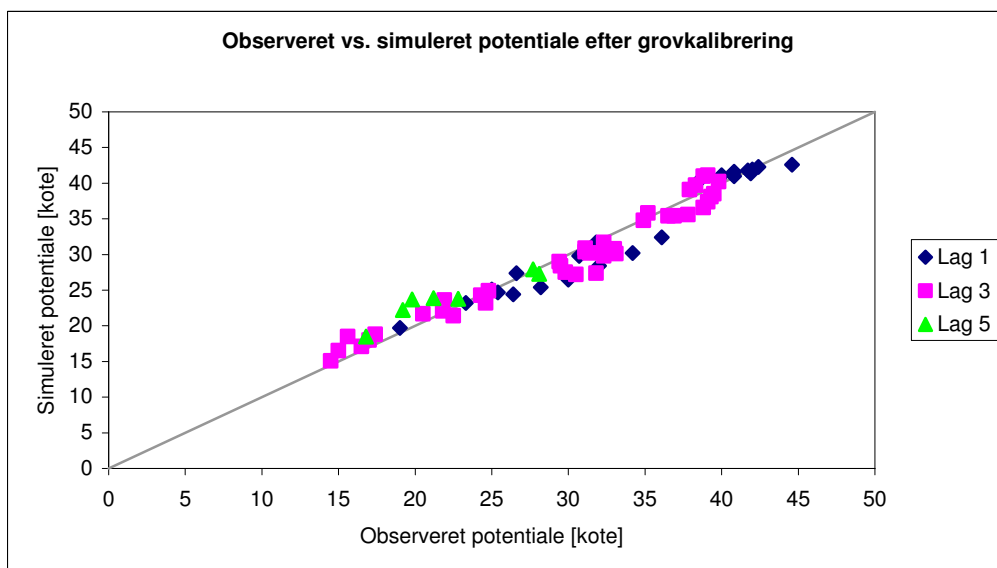


Figur 25. Observeret vs. simuleret vandføring

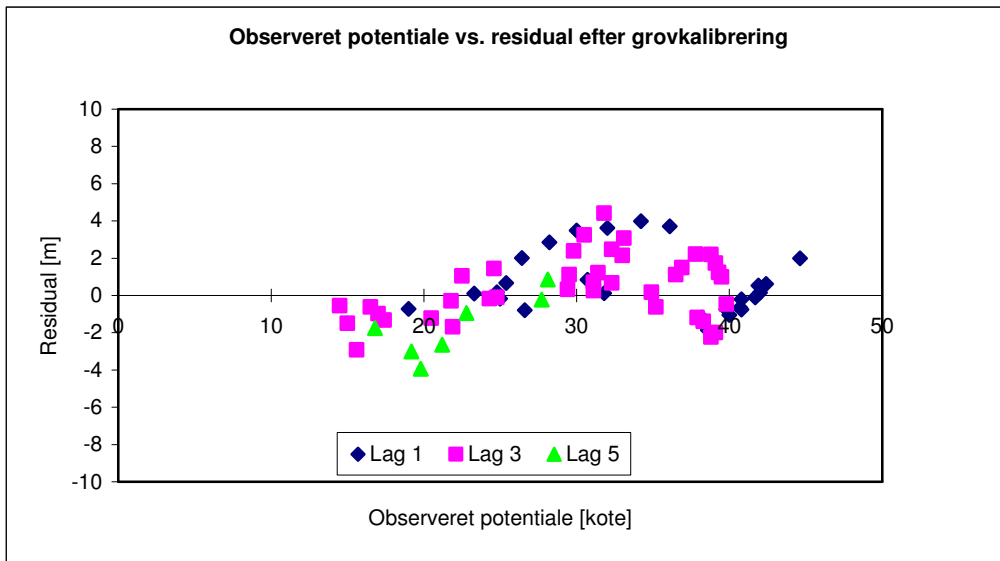
Lag	Antal data	RMS	MEA	ME
Alle lag	72	2,95	2,07	-0,96
1	26	4,27	3,37	-2,11
3	39	1,68	1,23	-0,05
5	7	2,35	1,93	-1,71

Tabel 5. Statistik for modellen og modellag inden grovkalibrering

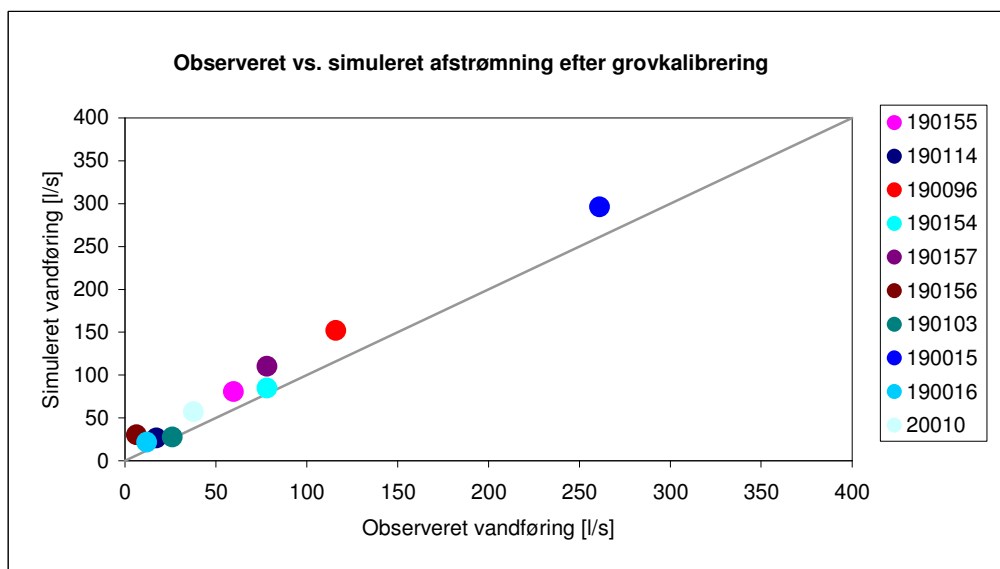
I den efterfølgende grovkalibrering er det forsøgt at mindske vandføringen og sænke potentialerne i modellen uden at ændre på infiltrationen. Grunden til at det er muligt er pga. de to ”generel head boundarys” (GHB) der er langs modellens sydvestlige rand og langs modellens nordlige rand, ved Jordbro Å. Ved at øge konduktansen for de to GHB’er øges udstrømningen af modellen hvorved både potentialerne og vandføringerne mindskes. Se Figur 26, Figur 27 og Figur 28.



Figur 26. Observeret vs. simuleret potentiale efter grovkalibrering



Figur 27. Observeret potentiale vs. residual efter grovkalibrering



Figur 28. Observeret vs. simuleret vandføring

Af Tabel 6 ses, at potentialerne globalt er underestimeret med 0,30 meter, og af Figur 28 ses, at vandføringen generelt stadig er overestimeret. Af Tabel 6 ses endvidere, at der for de vandførende lag 1, 3 og 5 er sket en væsentlig forbedring af bestemmelsen af potentialerne. Dog opfylder modellen ikke "high fidelity" kriterierne endnu.

Lag	Antal data	RMS	MEA	ME
Alle lag	72	1,78	1,42	0,30
1	26	1,82	1,38	0,38
3	39	1,68	1,35	0,49
5	7	2,32	1,95	-1,07

Tabel 6. Statistik for modellen og modellag efter grovkalibrering

6.2.2 Invers kalibrering

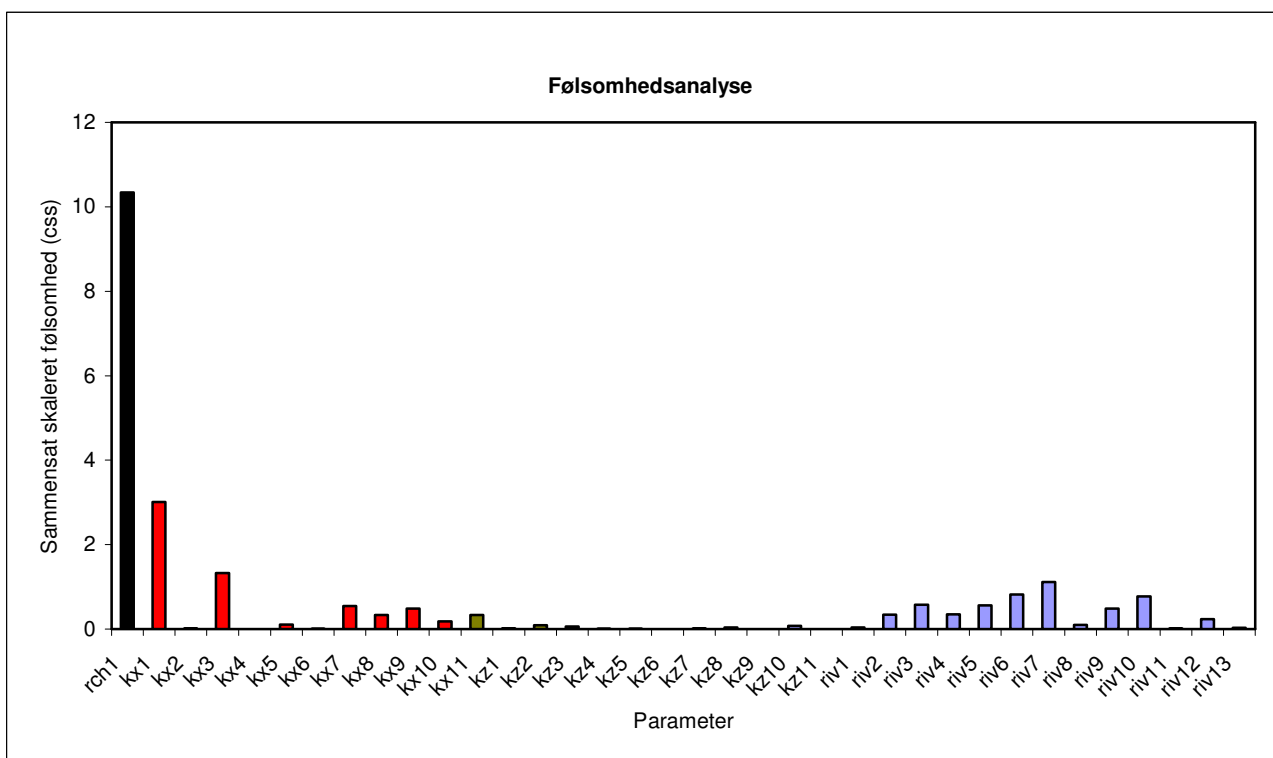
Formålet med den inverse kalibrering er ved en objektiv indgang at finde den kombination af parametre, hvor afvigelsen mellem observerede potentialer og vandføringer er mindst, således at modellen opfylder "high fidelity" kriterierne. Den inverse kalibrering er udført af WaterTech A/S /8/. Det følgende er et resume af den inverse kalibrering, samt konkludering på baggrund af de opnåede resultater fra den inverse kalibrering.

6.2.3 Resultater af den inverse kalibrering – kvantitative og kvalitative

I forbindelse med den inverse kalibrering udføres der en følsomhedsanalyse som udpeger de mest følsomme parametre /8/. Formålet med at udpege disse parametre er, at der ønskes en optimering af de parametre som har størst indflydelse på bestemmelsen af potentialer og vandføringer.

Af Figur 29 fremgår, at infiltrationen (rch1) er den suverænt mest følsomme parametre efterfulgt af de hydrauliske parametre for sandlagene i lag 1 og 3, K_{x1} og K_{x3} . For kalklagene er det de hydrauliske parametre K_{x5} , K_{x7} , og K_{x8} der er de mest følsomme parametre. Næsten samtlige vandløbskonduktanser (K_{riv}) er følsomme, med undtagelse K_{riv1} , K_{riv8} , K_{riv11} og K_{riv13} .

Erfaringsmæssigt er det muligt at bestemme de parametre inverst, som er tilknyttet en følsomhed der er ned til 1/10 af værdien af den mest følsomme parameter /8/. Det er opfyldt for parametrene rch1, K_{x1} , K_{x3} , K_{x7} , K_{x8} , K_{x9} , K_{x19} , K_{x11} , riv2, riv3, riv4, riv5, riv6, riv7, riv9, riv10, riv11 som således bestemmes ved den inverse kalibrering.



I forbindelse med den inverse kalibrering er de enkelte data tilknyttet en usikkerhed udtrykt ved en standardafvigelse. De tilknyttede usikkerheder til de enkelte kalibreringsdata indgår som vægte ($w_i = 1/s_{\text{obs},i}^2$) i den inverse kalibrering, således at kalibreringsdata med en lille usikkerhed er mere styrende for den inverse kalibrering end kalibreringsdata med en stor usikkerhed.

Der er efterfølgende udført 2 inverse kalibreringer af modellen /8/. Efter første kalibreringsrunde kan det konkluderes, at der er estimeret realistiske parameterstørrelser, hvilket delvist verificerer den hydrogeologiske konceptuelle model. Det er fundet, at en infiltration på 72% af den gennemsnitlige infiltration giver en optimal simulering af potentialer og vandføringer /8/. Da der er tale om en minimumssituation (sommer) vurderes det, at være en realistisk størrelse for infiltrationen. Vandføringen er simuleret på meget tilfredsstillende vis. Der er dog stadig en overvægt af positiv residualer.

I 2. kalibreringsrunde forsøges overvægten af positive residualer mindsket. Antallet af positive residualer er også mindsket i 2. kalibreringsrunde, se Figur 30 - Figur 33.

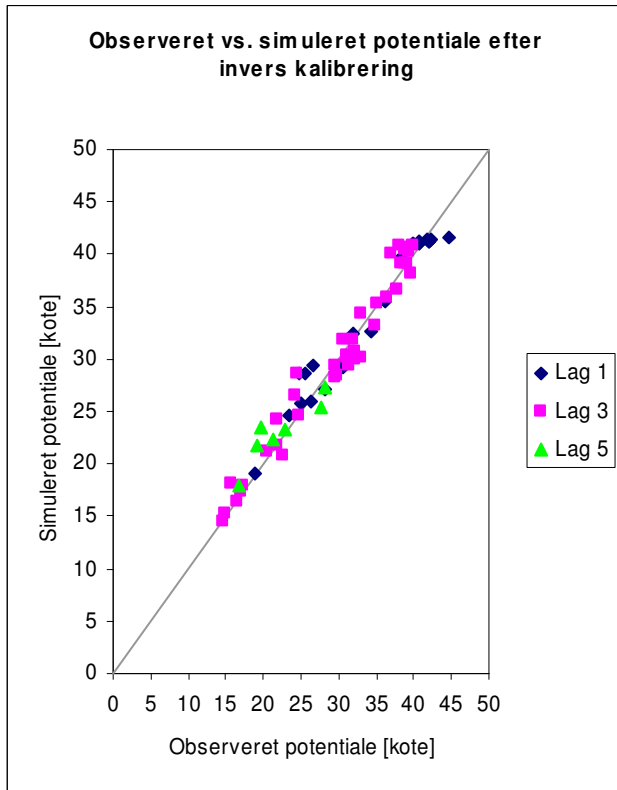
Dog er vandføringerne dårlige bestemt i 2. kalibreringsrunde, men stadig på tilfredsstillende vis. Det gælder specielt for Mønsted Å (strækning 7, st. nr. 190015) hvor vandføringen er estimeret 58 l/s for lavt. Dette skyldes, at konduktansen for denne strækning er mindsket for at øge potentialerne i observationsboringerne filtersat i lag 1 mellem Mønsted Å og Mønsted Bæk /8/. Overordnet set er potentialerne bedre bestemt i 2. kalibreringsrunde, hvorimod vandføringen er lidt dårligere bestemt, se Figur 34 - Figur 37.

Lag	Antal data	RMS	SE	MEA	ME
Alle lag	72	1,63	1,14*	1,29	-0,29
1	26	1,57	1,08	1,21	-0,26
3	39	1,59	1,12	1,26	-0,21
5	7	2,03	1,76	1,73	-0,82

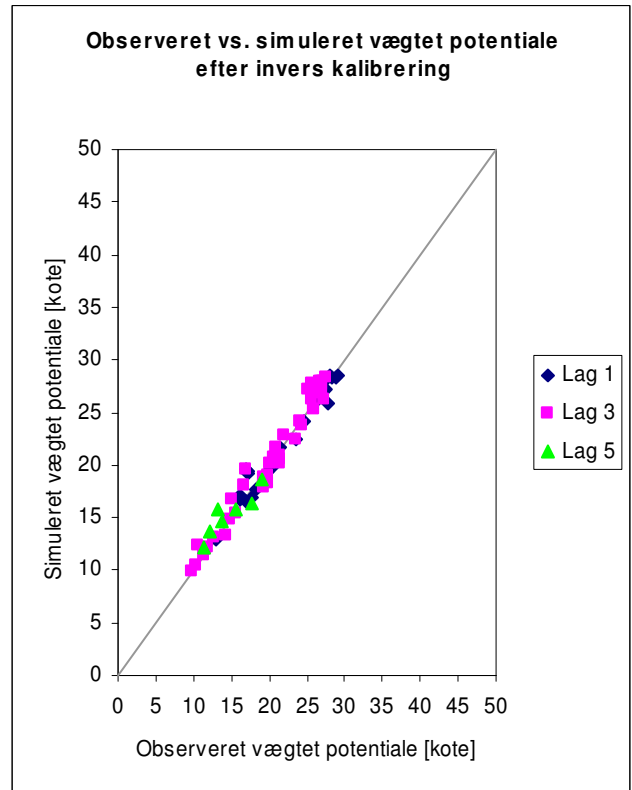
Tabel 7. Statistik for modellen og modellag efter invers kalibrering. *Kun udregnet for potentialer.

For vandføringerne og potentialerne er SE beregnet til 1,60. Grunden til at SE er noget større for vandføringerne og potentialer samlet er fordi vandføringerne er relativt dårligere bestemt end potentialerne. SE for vandføringerne er 8,98 hvilket er noget større end krav 4 hvor $SE \leq 1,65$. Grunden til at vandføringerne er relativt dårligere bestemt er primært pga. af en for lav vandføring i Mønsted Å, og en meget lille afstrømning i Mønsted Bæk som er svært at simulere.

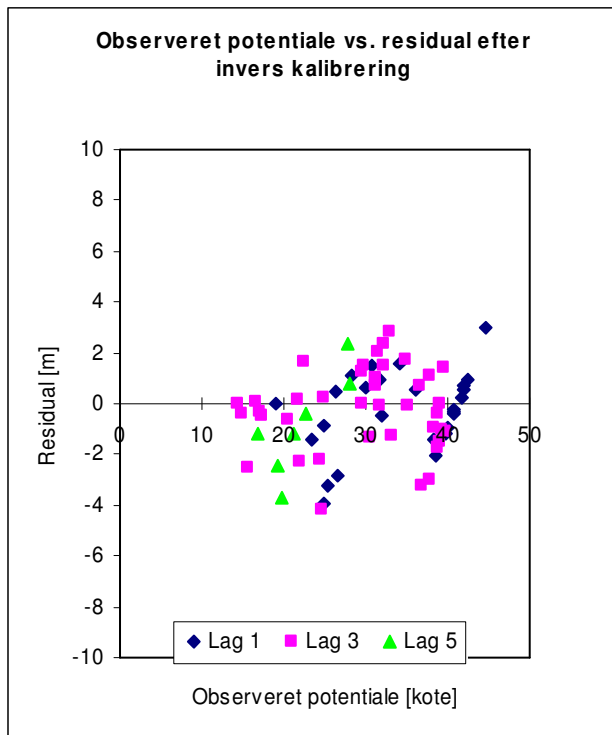
Af Tabel 7 ses, at krav 1 og 2 er opfyldt for modellen globalt, og for de enkelte vandførende lag. Krav 3 er ikke opfyldt for modellen globalt eller for de enkelte modellag. Dog er krav 4 opfyldt for modellen globalt og de enkelte modellag. Det skal i den forbindelse bemærkes, at det der bør fokuseres mere på SE end RMS da der i kalibreringskriteriet for SE tages højde for de tildelte usikkerheder /8/. Af bilag 12 ses statistikkerne for de observerede og simulerede vandføringer.



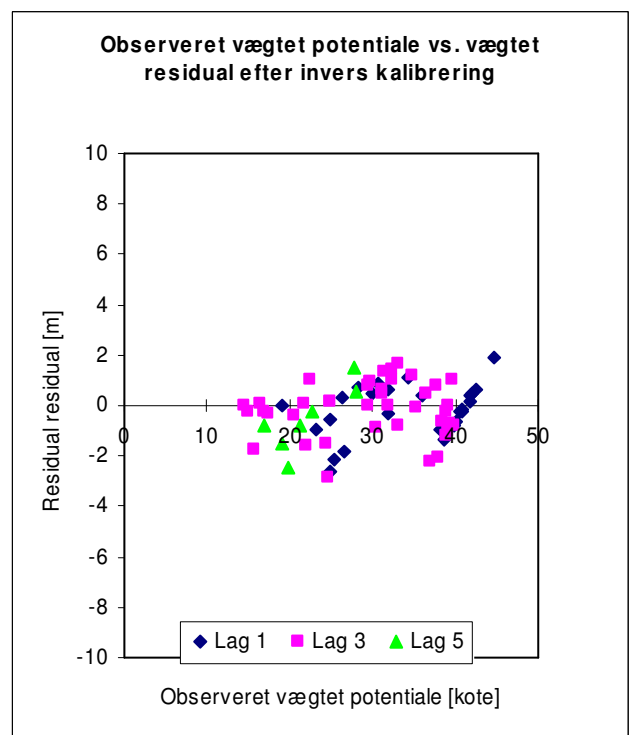
Figur 30. Observeret vs. simuleret potentiale.



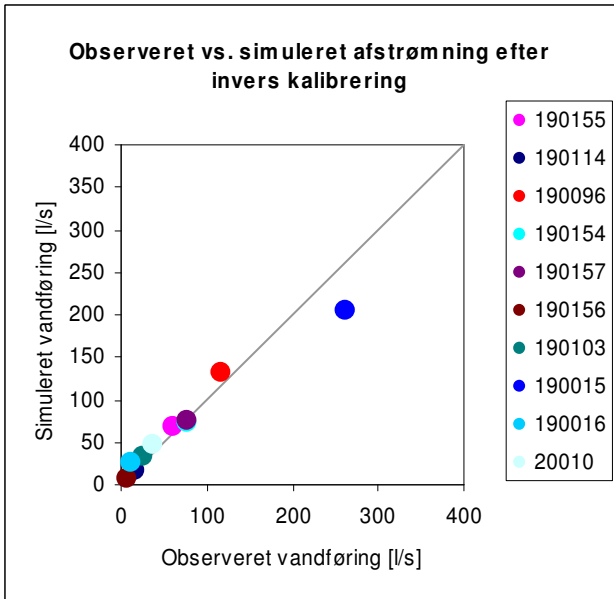
Figur 32. Observeret vs. simuleret vægtet potentiale



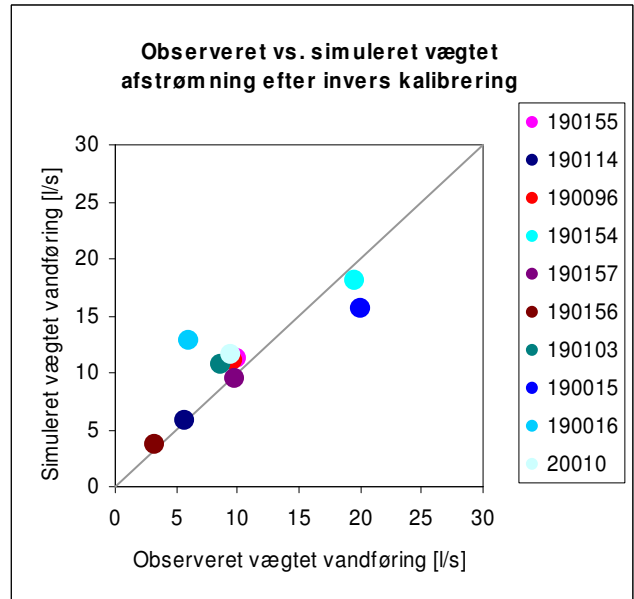
Figur 31. Observeret potentiale vs. residual.



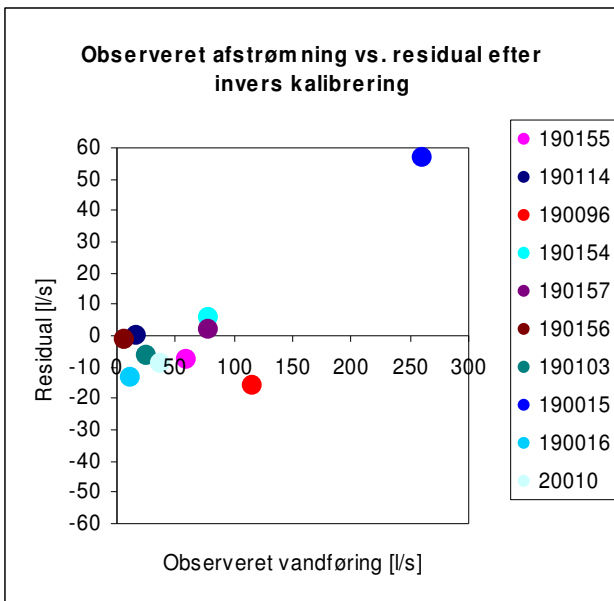
Figur 33. Vægtet observeret potentiale vs. vægtet residual



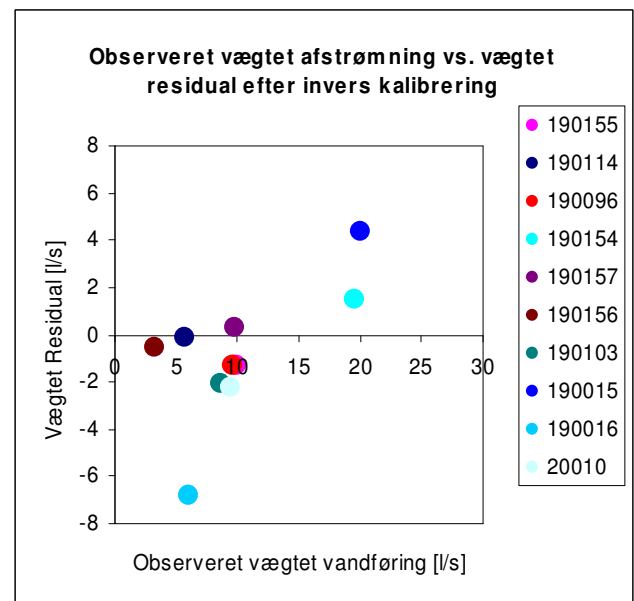
Figur 34. Observeret vs. simuleret vandføring



Figur 36. Vægтет observeret vs. vægтет simuleret vandføring



Figur 35. Observeret vandføring vs. residual



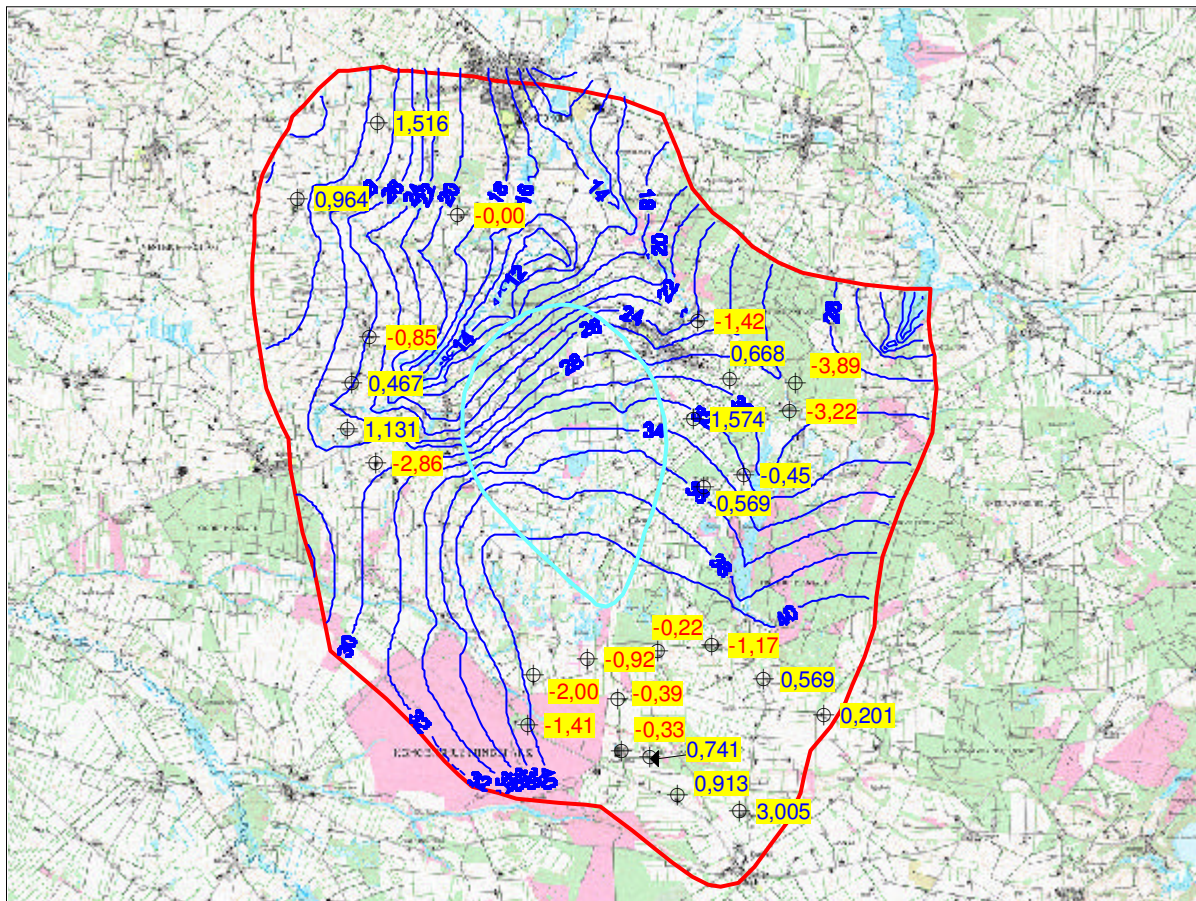
Figur 37. Vægтет observeret vs. vægтет residual

Vandbalancen for grundvandsmodellen fremgår af Tabel 8.

Type	Indstrømning [m ³ /s]	Udstrømning [m ³ /s]
Boring		0,0357116
Generel head boundary	0,0152668	0,2391305
Vandløb	0,0067566	0,7540208
Infiltration	1,0038918	
Total	1,0259152	1,0288629
Differens	-0,0029477	

Tabel 8. Vandbalance for grundvandsmodel.

Af tabellen ses, at der er konsistens mellem ind- og udstrømning i modellen. Den samlede grundvandsdannelse i OSD er af modellen beregnet til 2,8 mill. m³/år. Ved en B1/B2-målsætning (maksimal påvirkning af medianminimumsafstrømning på hhv. 10 og 15%) af vandløbene i området giver det tilgængelig grundvandsressource til indvinding på 280.000-425.000 m³/år. Den samlede indvinding (vandværker, private indvindinger og markvandingsboringer) udgør i dag 90.000 m³/år.



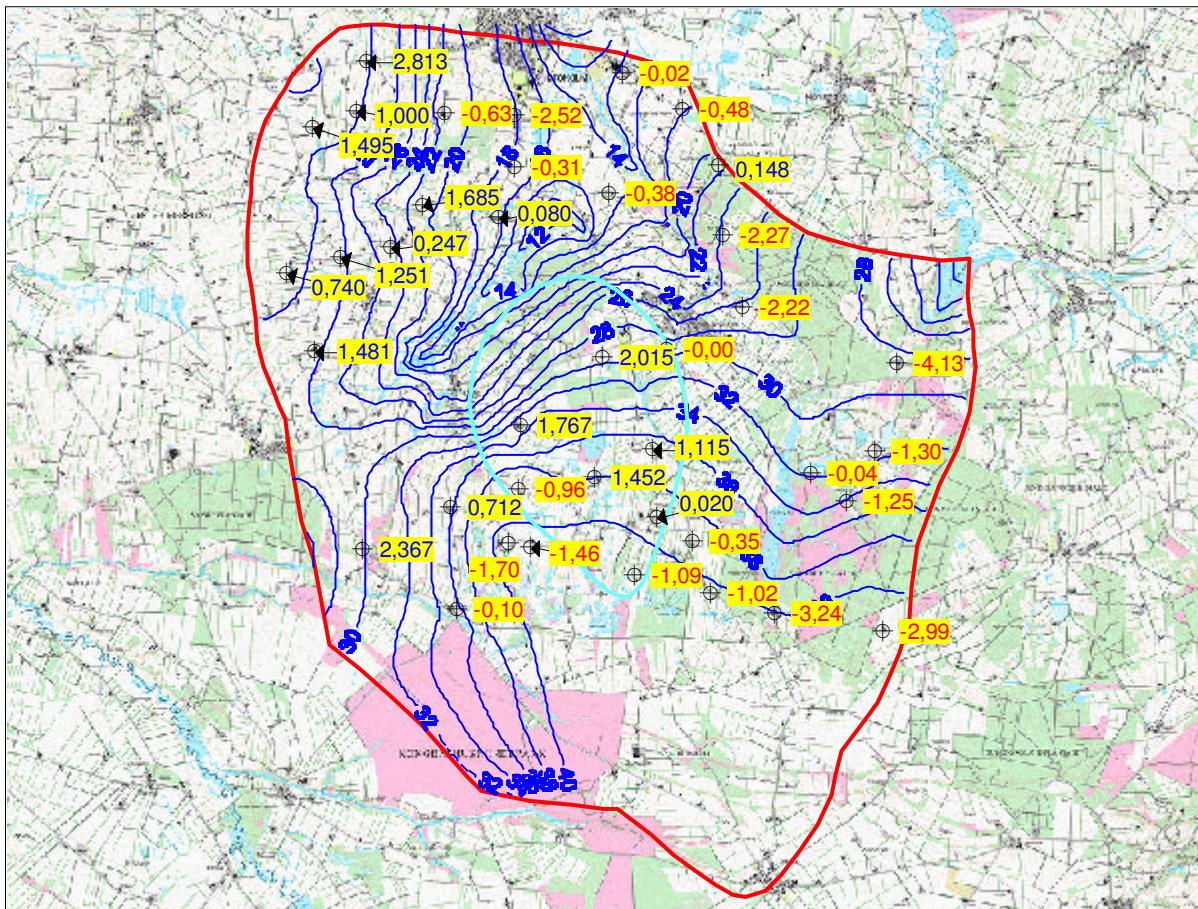
Figur 38. Simuleret grundvandspotentialie i lag 1, samt residualer (meter) for targets.

Af figurerne Figur 38-Figur 40 ses de simulerede potentialer for lag 1,3 og 5, samt residualerne i observationsboringerne (targets). Af figurerne ses, at grundvandsmodellen rent kvalitativt på tilfredsstillende vis simulerer det observerede konturerede primære grundvandspotential (se Figur 8 for sammenligning med det observerede primære potentialie). Negative residualer (rød tekst på gul baggrund) betyder at grundvandsmodellen simulerer for lave potentialer i forhold til de observerede

potentialer. Positive residualer (blå tekst på gul baggrund) betyder at grundvandsmodellen simulerer for høje potentialer i forhold til de observerede potentialer.

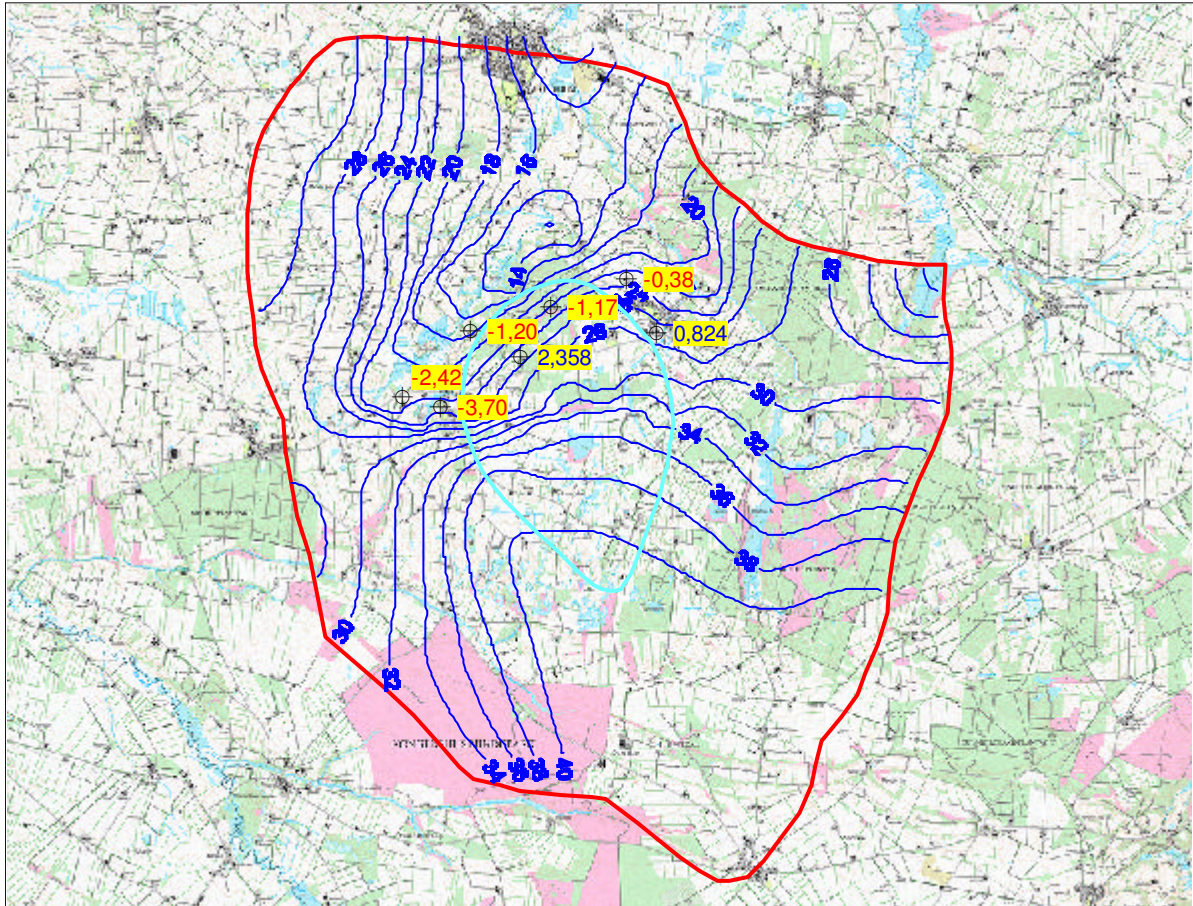
Af Figur 38 ses, at der er en bias i den sydlige del af modelområdet hvor potentialer nær randen simuleres for højt, mens potentialerne nordligere simuleres for lavt. Det ses ligeledes, at potentialerne umiddelbart vest for Mønsted Å simuleres for højt, mens de umiddelbart øst for åen simuleres for lavt.

Targets for lag 3 er fordelt mere jævnt over området i forhold til targets i lag 1. Der er bias i modellen med potentialer der er simuleret for lavt i den sydlige del af modellen, mens de er simuleret for højt i den nordvestlige del af model.



Figur 39. Simuleret grundvandspotentiale i lag 3, samt residualer for targets.

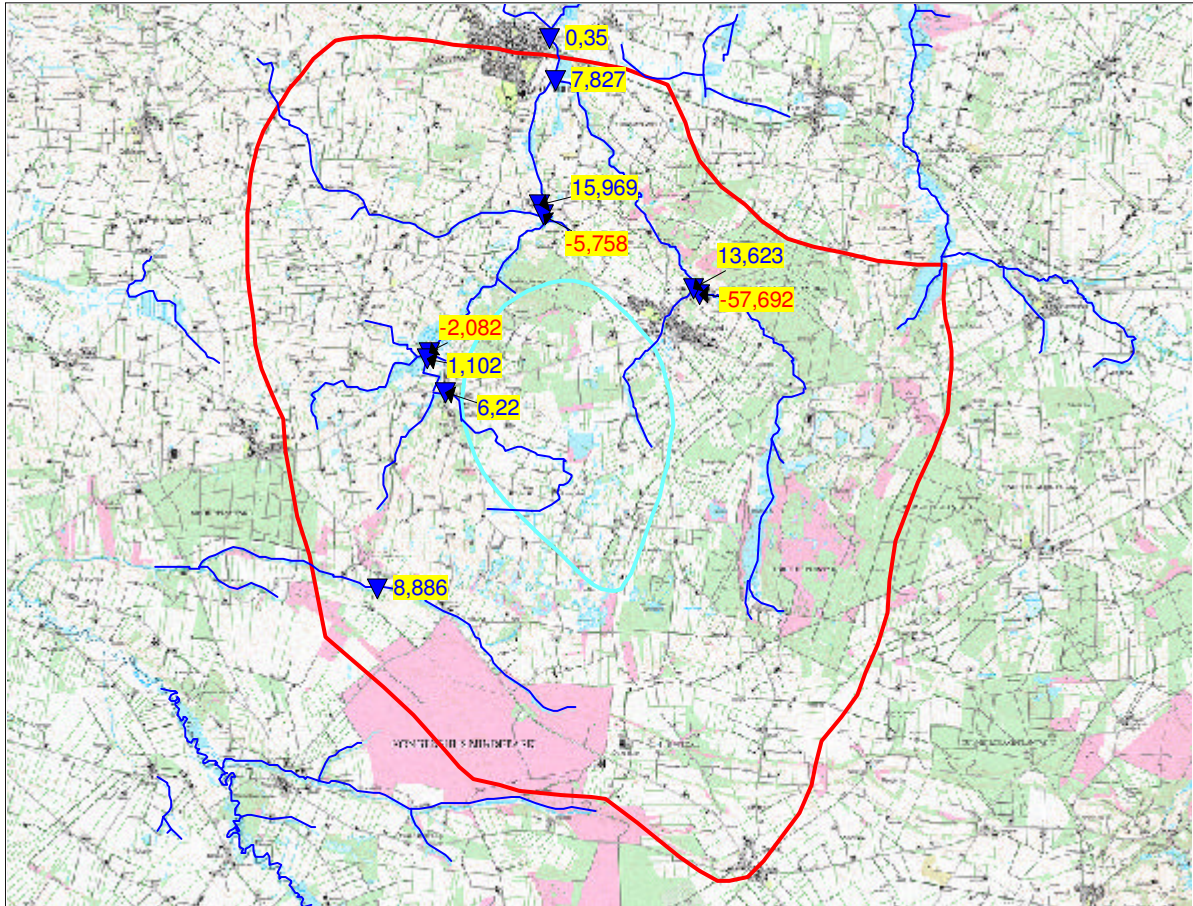
I lag 5 (kalken) er der kun 7 targets. Generelt er potentialet dårligere bestemt i kalken end for sandmagasinerne i lag 1 og 3. Det skyldes højst sandsynligt kalkens dobbeltporøsitet hvor der forekommer en strømning i både matrix og i større sprækker i kalken, samt at der er meget få targets at kalibrere modellen op imod.



Figur 40. Simuleret grundvandspotentiale i lag 5, samt residualer for targets.

Af Figur 41 ses afstrømningsresidualerne. Negative residualer (rød tekst på gul baggrund) betyder at grundvandsmodellen simulerer for lave afstrømninger i forhold til de observerede afstrømninger. Positive residualer (blå tekst på gul baggrund) betyder at grundvandsmodellen simulerer for høje afstrømninger i forhold til de observerede afstrømninger.

Af figuren ses, at vandføringerne generelt er godt bestemt. Dog har det været meget svært at simulere vandføringen for Mønsted Å opstrøms udløbet af Mønsted Bæk til Mønsted Å. Der simuleres afstrømningen ca. 60 l/s for lavt (observeret afstrømning er 261 l/s). Den lave afstrømningssimulering for denne delstrækning skyldes, at det i kalibreringsprocessen har været nødvendigt af mindske konduktansen for vandløbsbunden for at hæve potentialerne i lag 3 umiddelbart øst for Mønsted Å. Den lave vandløbskonduktans for denne delstrækning betyder, at potentialerne overestimeres umiddelbart vest for Mønsted Å.



Figur 41. Afstrømningsresidualer (l/s)

6.3 Modelsvagheder

Centralt i grundvandsmodellen er der store områder i lag 1 (øverste sandmagasin) med tørre celler, og i lag 2,3, og 4 er der ligeledes centralt i modelområdet områder med tørre celler. At cellerne er tørre er reelt – de afspejler den fysiske tilstand på korrekt vis. Således befinder grundvandsspejlet sig 5-10 meter under kalkoverfladen. Det medfører naturligt at cellerne i de ovenliggende lag bliver tørre. Det har grundvandsmodelprogrammet Groundwater Vistas dog haft meget svært ved at håndtere. Ved de første beregninger af partikelbaner udført med ”Modpath” modulet beregnede Modpath partikelbaner i celler som var tørre. Det er en åbenlys fejl.

Problemet med partikelbaner i de tørre celler blev omgået ved først at køre ”Modflow” modulet til beregning af potentialer og afstrømninger. Efterfølgende blev de tørre celler konverteret til ”No-flow” celler. Derefter blev ”Modpath” modulet anvendt til partikelbaneberegningerne. Det resulterede i at der nu kun blev lavet partikelbaneberegninger i ”våde” celler hvilket gav et mere tilfredsstillende resultat.

Den meget komplekse geologi centralt i OSD – se kapitel 3 for nærmere omtale, bevirker også grundvandsstrømningen i lige netop dette interesseområde er meget svær at kortlægge. Således blev bund af det tertiære ler/top af kalkoverfladen ikke fundet i undersøgelsesboringen DGU nr. 66.1895. Det betyder, at der stadig er nogen usikkerhed om der er grundvandsstrømningen i kalken under den tertiære lerbarriere eller om grundvandsstrømningen primært foregår i de kvartære sandmagasiner henover barrieren.

Udenfor OSD – i den øvrige del af modelområdet – hvor der ikke er foretaget nogen geofysisk kortlægning, er fastlæggelsen af laggrænser meget usikker idet der kun har været geologisk information til rådighed i form af eksisterende boringer.

7. Modelscenarier

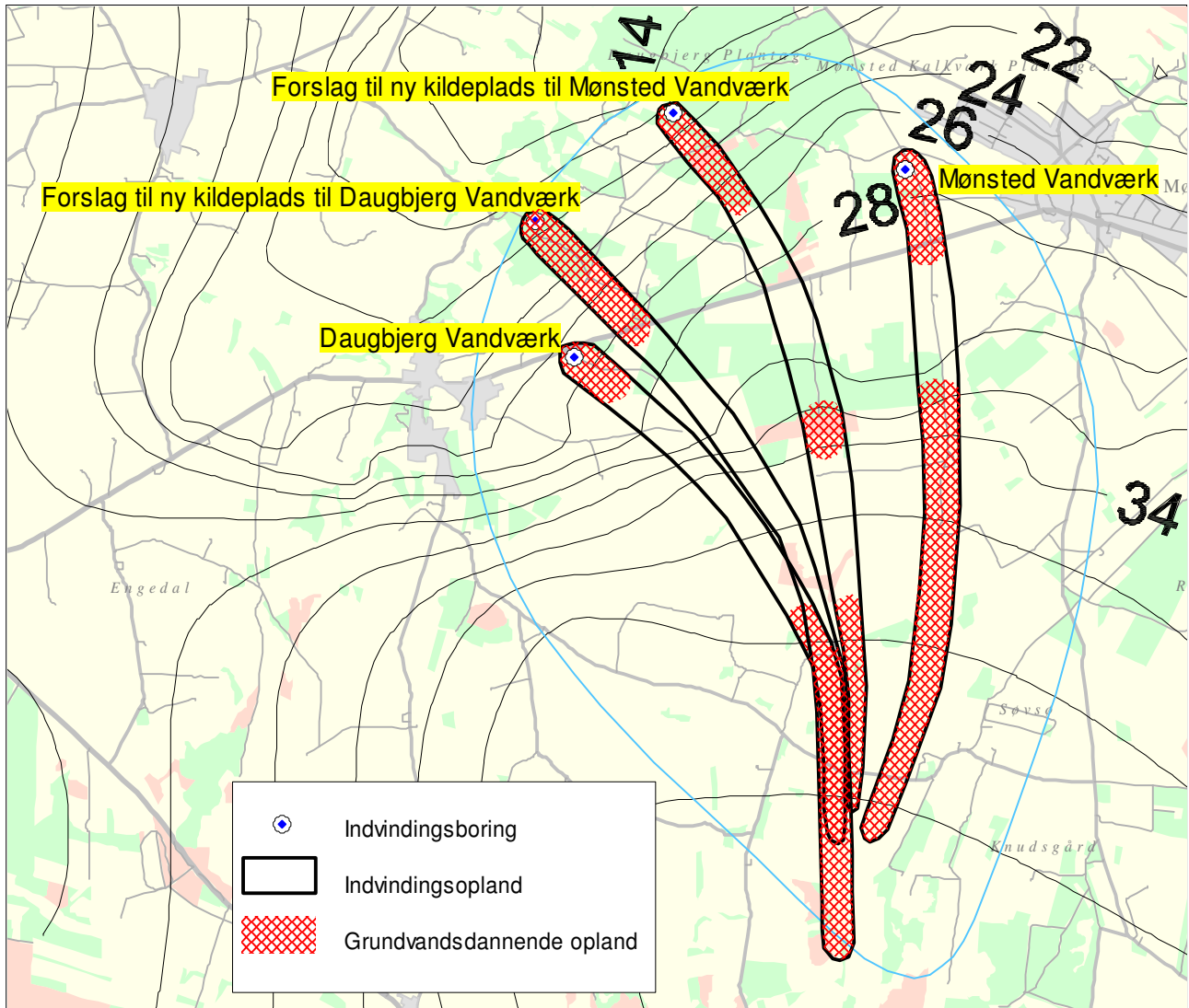
I OSD er der to vandværker; Mønsted og Daugbjerg Vandværker. Begge vandværker indvinder fra kalkmagasinet. Se Figur 42 for placering af vandværkernes indvindingsboringer.

Mønsted Vandværks indvindingsboringer, DGU nr. 66.1351 og 66.1741 ligger umiddelbart nedstrøms Mønsted Skole. Boringerne er 54 meter dybde. Boringerne er ikke filtersatte men står som åbenstående boringer i kalken. Vandværkets indvindingstilladelse er på 75.000 m³/år. Sidste 3 års løbende gennemsnit er på 50.000 m³/år.

Daugbjerg Vandværks indvindingsboringer, DGU nr. 66.978 og 66.979, ligger sydøst for Daugbjerg. Boringerne er 73 meter dybde, og er ligeledes åbenstående boringer i kalken. Vandværkets indvindingstilladelse er på 30.000 m³/år. Sidste 3 års løbende gennemsnit er på 25.000 m³/år.

De grundvandsdannende oplande til vandværkerne er beregnet ved at placere 540 partikler (30 lag hver indeholdende 9 partikler) i hver indvindingsboring. Derefter er der lavet en revers partikelbaneberegning med programmet "Modpath", hvor partikelbanerne beregnes baglæns fra indvindingsboringerne, og op til terrænoverfladen (eller øverste aktive lag). Indvindingsoplande og de grundvandsdannende oplande til vandværkerne ses på Figur 42.

På figuren er oplandene til en fiktiv ny kildeplads til Mønsted og Daugbjerg Vandværker ligeledes indtegnet. Af figuren ses at for alle 4 oplande der er det grundvandsdannende opland delt i 2. Deling af det grundvandsdannende opland skyldes den nord-syd gående sprækkestrukturen i kalken, hvori der er aflejret tertiært ler. Det tertiære ler virker som en barriere hvilket betyder, at vandet syd for strukturen strømmer under denne i kalkmagasinet. Over strukturen er cellerne tørre i lag 1-3 hvilket betyder, at der ikke er grundvandsdannelse i dette område til indvindingsboringerne.

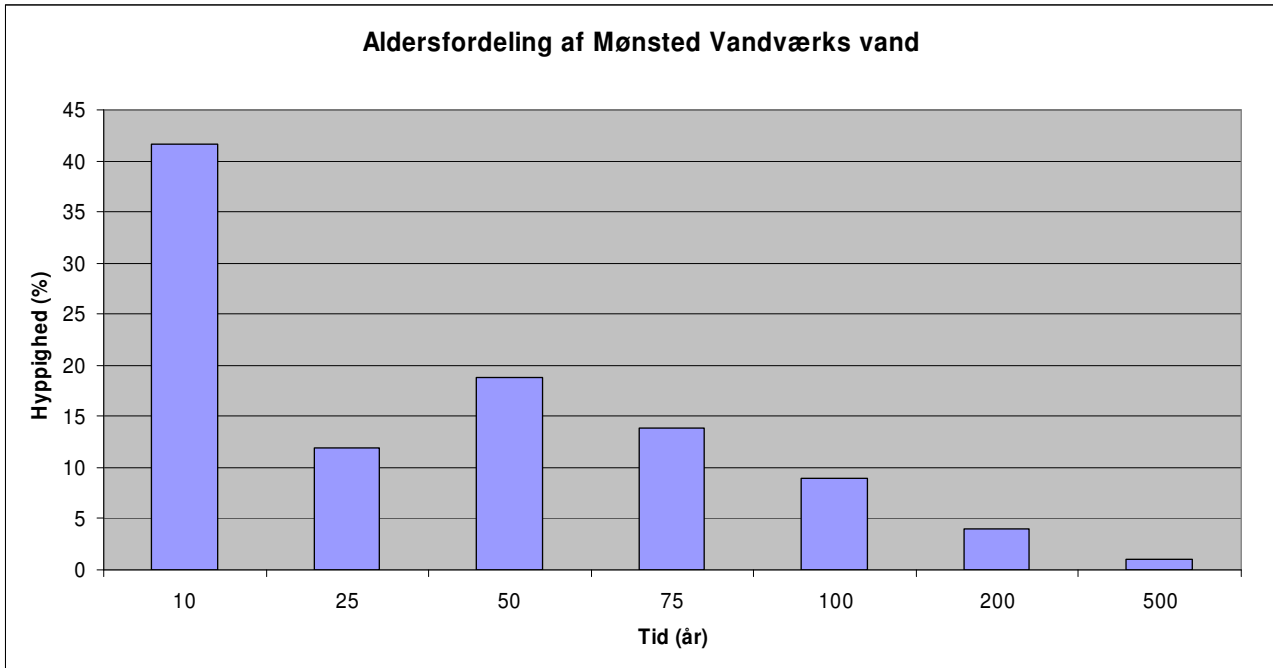


Figur 42. Grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande til Mønsted og Daugbjerg Vandværker, samt forslag til ny kildeplads til Mønsted Vandværk.

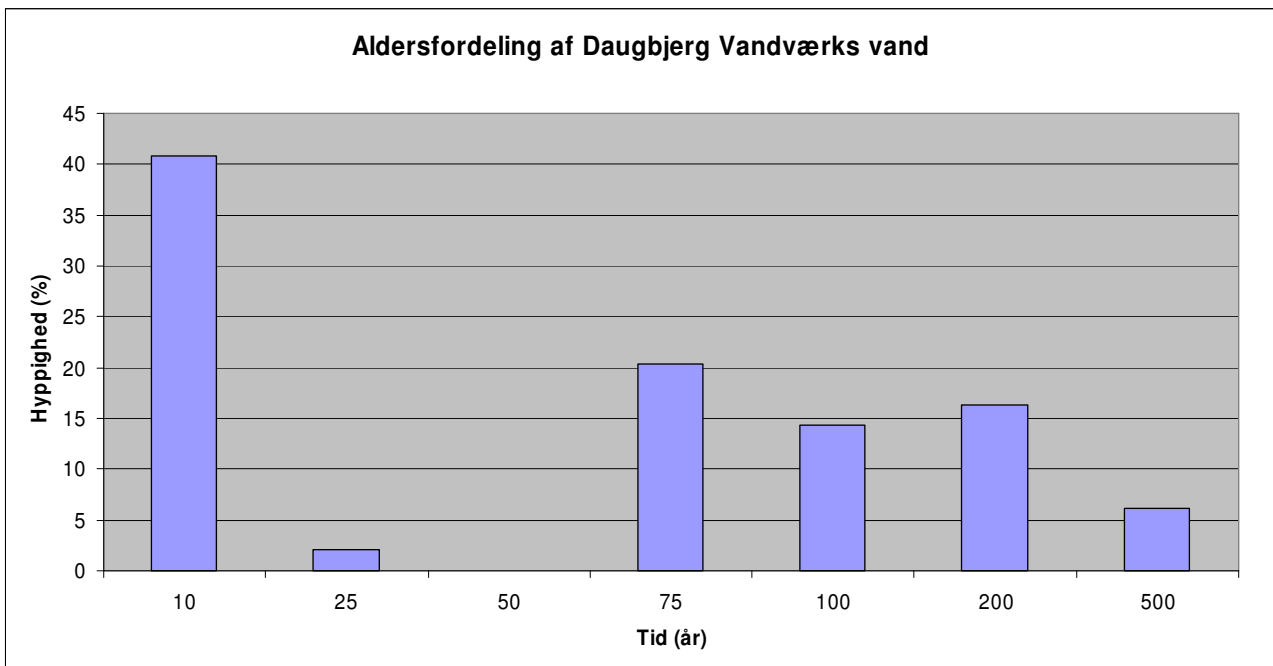
7.2 Aldersfordeling af indvundet grundvand og nitratudvikling

På baggrund af partikelbaneberegningerne er aldersfordelingen beregnet af det vand som Mønsted og Daugbjerg Vandværker indvinder. Se Figur 43 og Figur 44.

Figurerne viser, at det overvejende er ungt vandværkerne indvinder. Således er 42% af det vand Mønsted Vandværk indvinder yngre en 10 år, og for Daugbjerg Vandværk er 40% yngre end 10 år. Af Figur 45 ses aldersfordelingen af vandpartikler i det grundvandsdannende opland til Mønsted og Daugbjerg Vandværk, samt i oplande til forslag til nye kildepladser til disse vandværker.



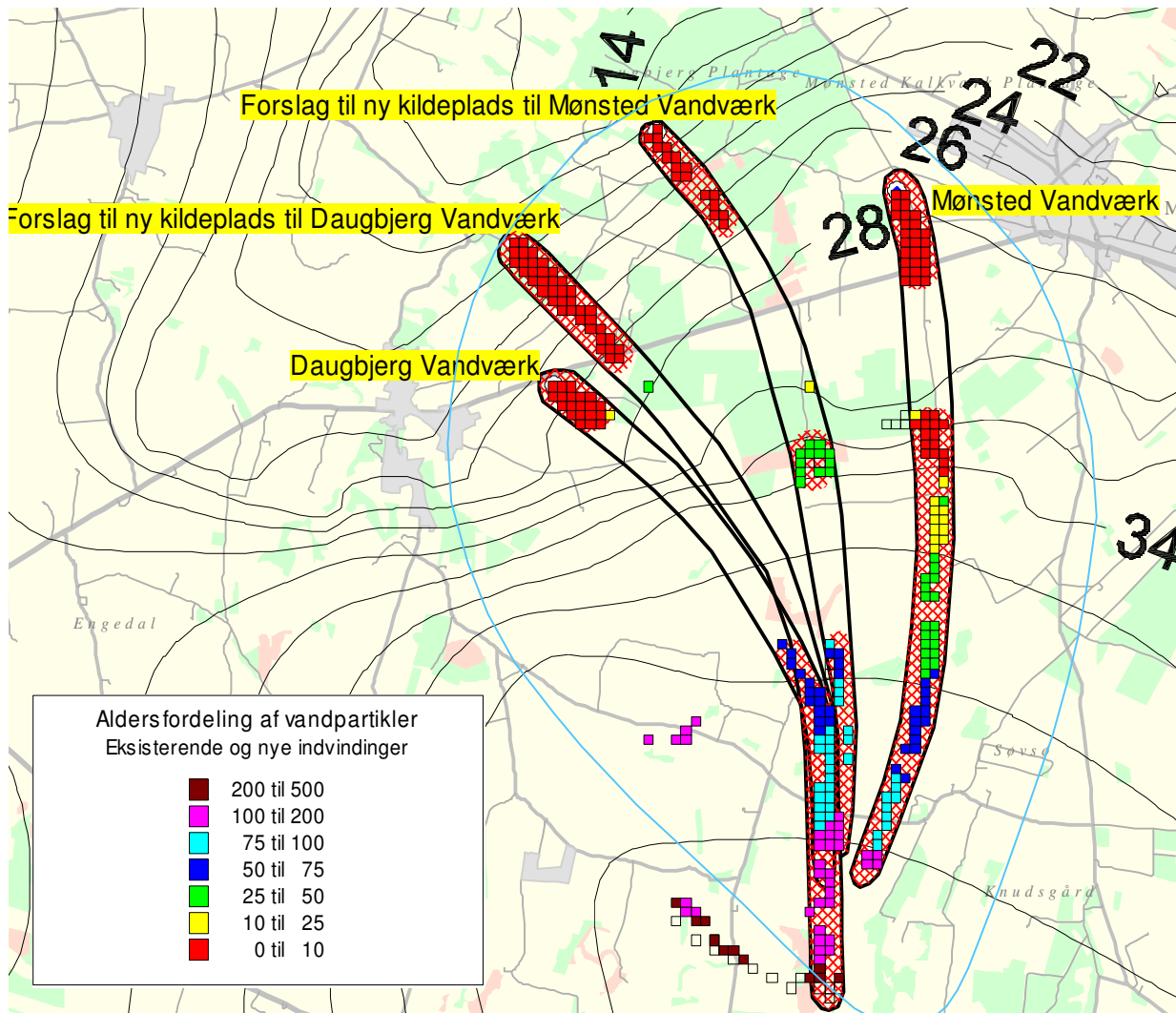
Figur 43. Aldersfordeling af det grundvand Mønsted Vandværk indvinder.



Figur 44. Aldersfordeling af det grundvand Daugbjerg Vandværk indvinder.

På baggrund af partikelbaneberegningerne er den forventede nitratudvikling for vandværkerne modelleret. Ved modellering af nitratudviklingen forudsættes det at der udvaskes 70 mg nitrat/l på dyrkede arealer, og 10 mg/l på skovarealer, og arealer med vedvarende græs. Af Figur 46-Figur 47 ses den modellerede nitratudvikling for Mønsted og Daugbjerg Vandværker. Af Figur 45 ses, at det grundvandsdannende opland til både Mønsted og Daugbjerg Vandværker udgøres af opdyrkede arealer. Derfor forudsættes det, at der i hele det grundvandsdannende opland til begge vandværker

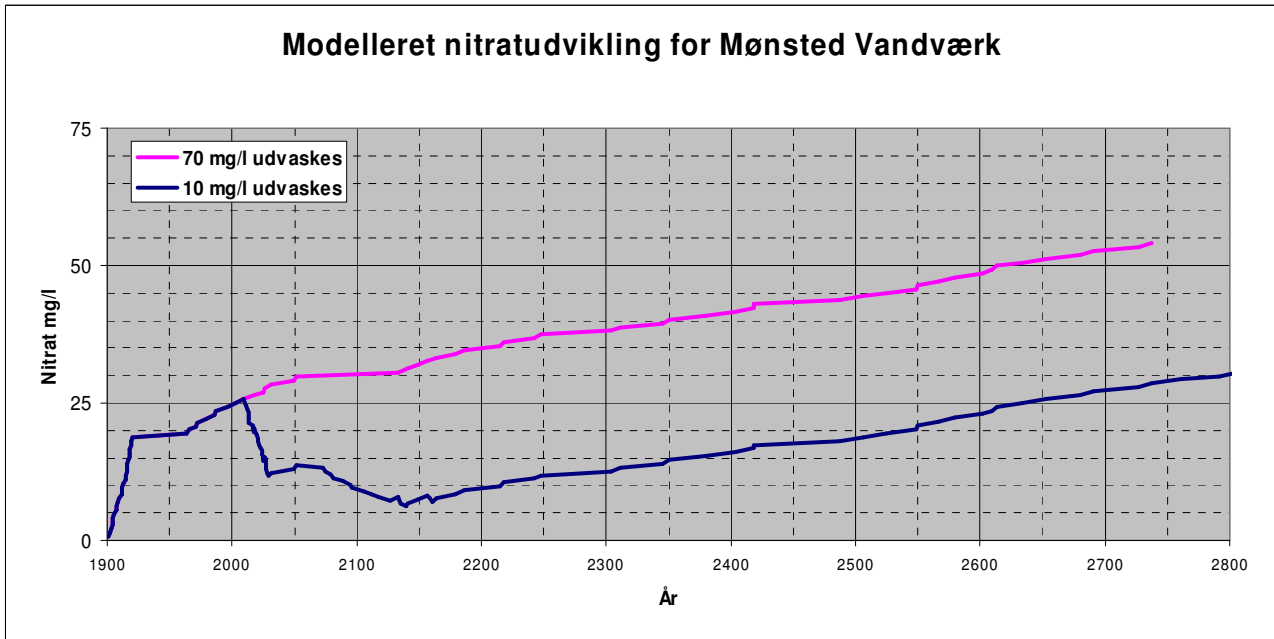
udvaskes 70 mg nitrat/l. Af figurerne ses, at allerede ved etablering af indvindingsboringerne først i 1980'erne var nitratindholdet relativt højt med omkring 20 mg nitrat/l.



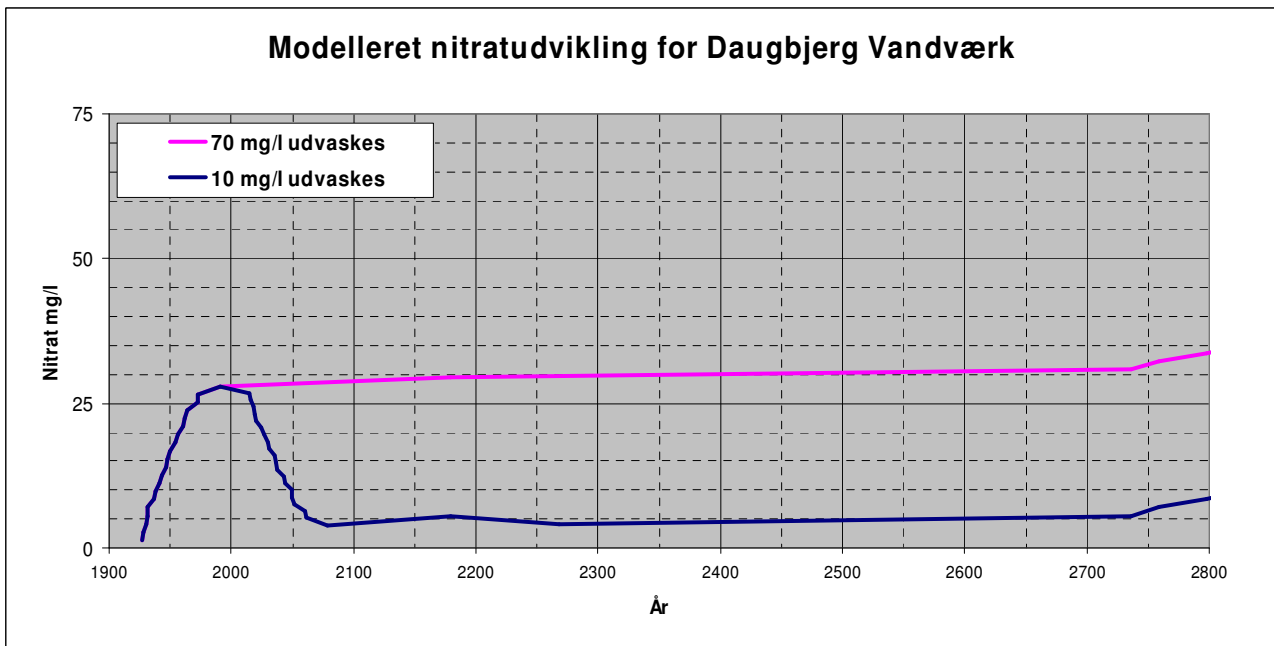
Figur 45. Aldersfordeling af indvundet grundvand.

Da kriterierne for hvornår en vandværksindvinding i Viborg Amt betegnes som nitratfølsom er bestemt ved at nitratindholdet i det indvundne vand ikke må overskride 25 mg/l inden for 200 år, så ses det af figurerne for nitratudviklingen for vandværkerne, at det kriterie allerede er overskredet kort tid efter etableringen af kildepladsen for Daugbjerg Vandværk. For Mønsted Vandværk skete overskridelsen midt i 1990'erne. Derfor må indvindingerne for begge vandværker betegnes som nitratfølsomme, og de er derfor indsatsområder med hensyn til nitrat.

Ved at sammenholde værdierne fra den modellerede nitratudvikling og målte analyseværdier, ses en relativ god overensstemmelse mellem modellerede og målte nitratkoncentrationer. Se Figur 13 og Figur 14 for målte nitratkoncentrationer.



Figur 46. Modelleret nitratudvaskning for Mønsted Vandværk



Figur 47. Modelleret nitratudvikling for Daugbjerg Vandværk

7.3 Mulige indsatser overfor nitrat

Indsatsen kan enten foretages ved at braklægge opdyrkede arealer eller tilplante disse med skov inden for indvindingsoplandet for vandværket eller ved at flytte indvindingen til skovarealer hvor udvaskningen af nitrat til grundvandet er væsentligt lavere. Iværksættes en indsats som en braklægning af opdyrkede arealer inden for indvindingsoplandet til vandværket skal den være af et sådan

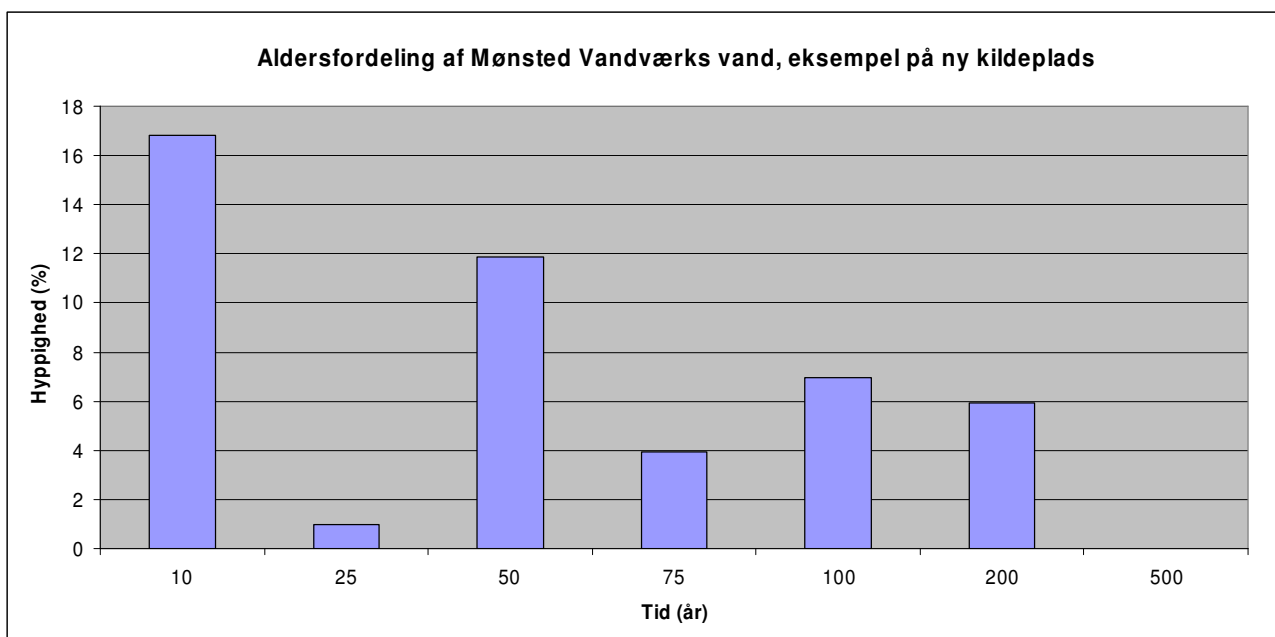
omfang at kriterierne for hvornår indvindingsoplandet betegnes som nitratfølsomt ikke er opfyldt. Dvs. ingen overskridelse af 25 mg nitrat/l inden for 200 år.

Som regneeksempel er der lavet et scenarie hvor ca. 1/3 af det grundvandsdannende opland til vandværket braklægges. Det svarer til en braklægning af de arealer hvor vandet, som vandværket indvinder, er yngre end 10 år. Ved braklægningen forudsættes det, at der fra det braklagte arealer udvaskes 10 mg/l svarende til vedvarende græs eller tilplantning med skov.

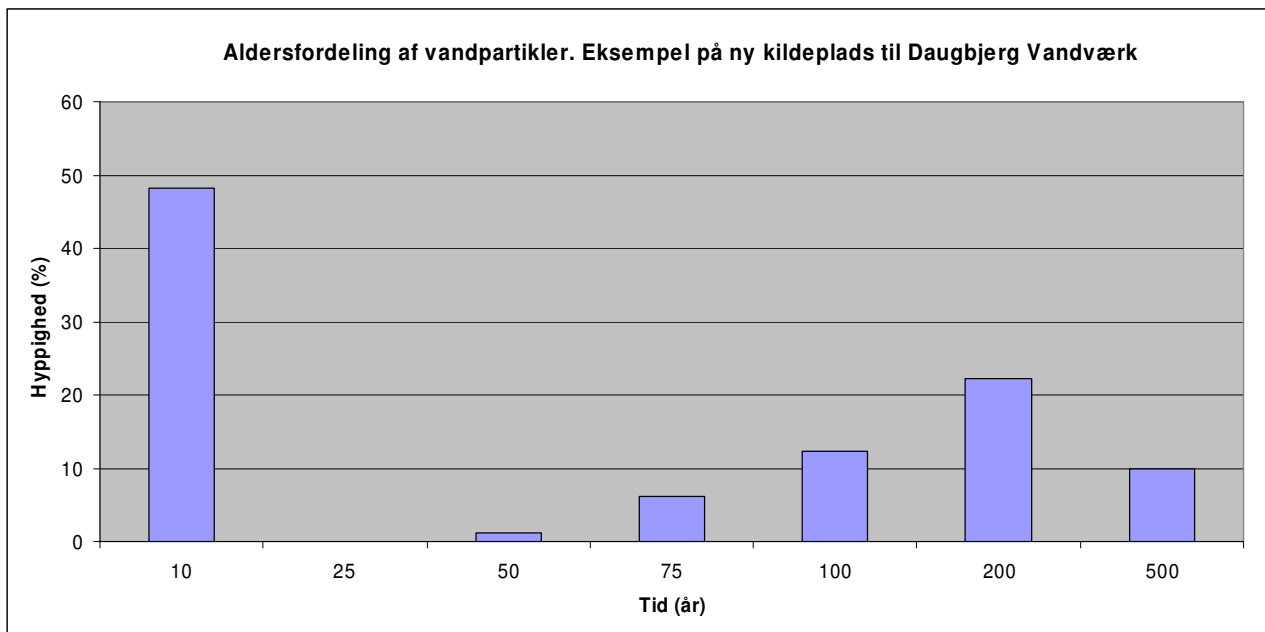
For begge vandværker på Figur 46 og Figur 47 ses et markant fald i nitratindholdet. Inden for de første 100 år falder nitratkoncentrationerne til mellem 5 og 10 mg/l. Det der sker ved en braklægning af disse arealer er, at det indvundne grundvand, som stammer fra disse arealer, nu bidrager med langt mindre nitrat. Derved sker der en "fortynding" af nitratindholdet i det vand vandværket indvinder. Pga. at vandet fra disse arealer meget hurtigt strømmer til indvindingsboringen ses der hurtigt en effekt af braklægningen.

Som alternativ til braklægningen kan indvindingsboringerne flyttes til skovarealer hvor udvaskningen naturligt er lav. Derfor er der lavet et scenarie for Mønsted og Daugbjerg Vandværker hvor deres kildepladser flyttes til Daugbjerg Plantage. Indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande, og aldersfordeling af det indvundne vand ses af Figur 42 og Figur 45. Som det ses af Figur 42, så ligger hovedparten af det grundvandsdannende opland for forslag til Mønsted Vandværk i skovarealer. I forslaget til ny kildeplads til Daugbjerg Vandværk er det kun ca. 1/3 af det grundvandsdannende opland der ligger i skovområder. Da der er tale om fiktive indvindinger kan nitratindholdet til disse indvindinger kun skønnes. På baggrund af vandanalyser taget på private indvindinger i Daugbjerg Plantage skønnes nitratindholdet at ligge på 5-15 mg/l.

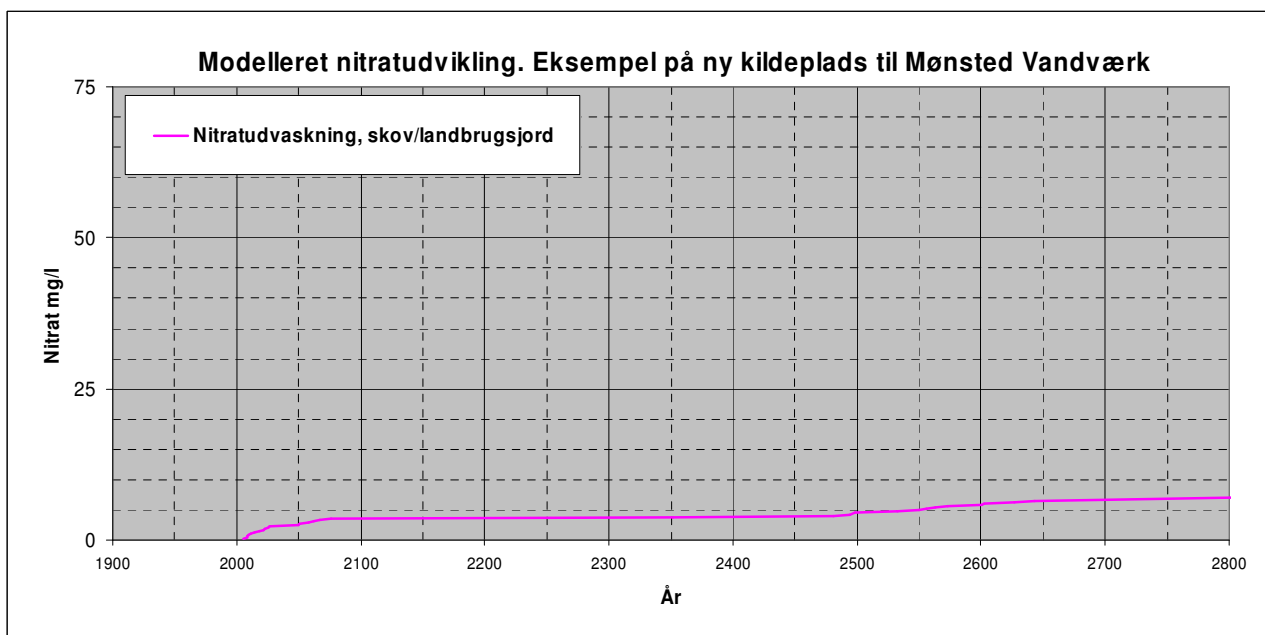
Af Figur 48 og Figur 49 ses aldersfordelingen af det indvundne grundvand for de 2 nye fiktive indvindinger, og af Figur 50 og Figur 51 ses den forventede nitratudvikling. For indvindingen til Mønsted Vandværk skønnes det indvundne vand at indeholde ca. 5 mg/l, og for indvindingen til Daugbjerg Vandværk skønnes nitratindholdet at være ca. 10 mg/l. Disse nitratværdier svarer til det der er observeret i private indvindinger i plantageområdet. Ved en flytning af kildepladserne vil nitratindholdet i det indvundne grundvand derfor ikke overstige 25 mg/l inden for 200 år, og indvindingerne er derved ikke nitratfølsomme.



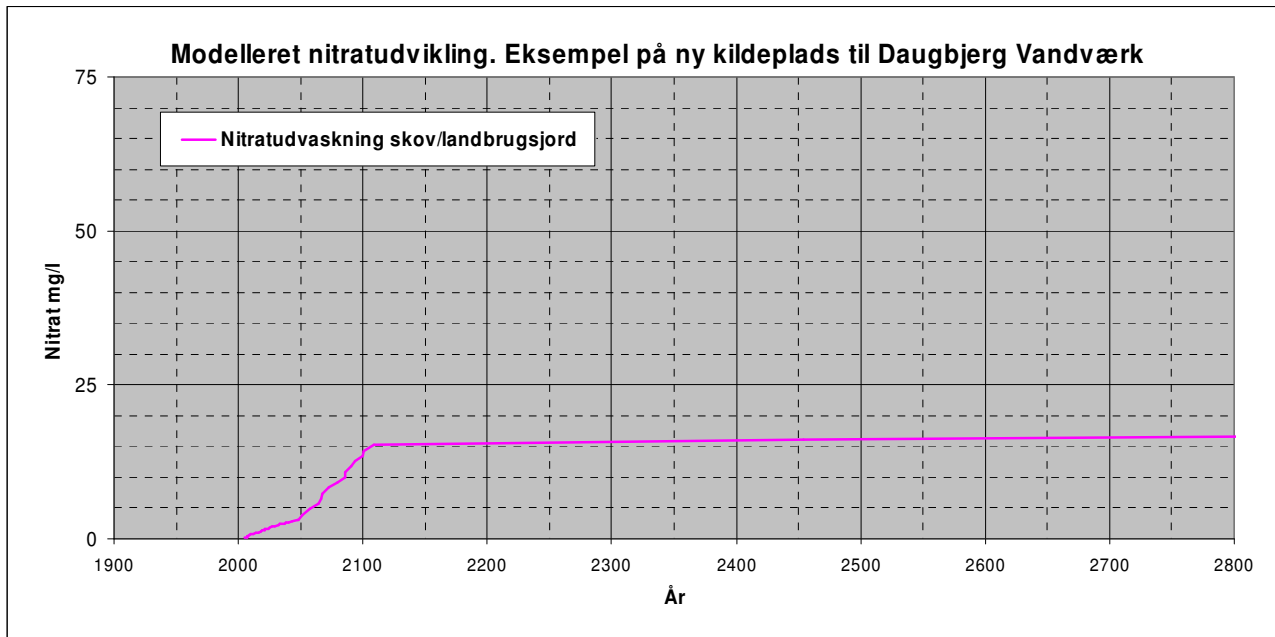
Figur 48. Aldersfordeling af indvundet grundvand for ny kildeplads til Mønsted Vandværk.



Figur 49. Aldersfordeling af indvundet grundvand for ny kildeplads til Daugbjerg Vandværk.



Figur 50. Modelleret nitratudvikling for ny kildeplads til Mønsted Vandværk.



Figur 51. Modelleret nitratudvikling for ny kildeplads til Daugbjerg Vandværk.

7.4 anbefalinger i forhold til mulige indsats overfor nitrat

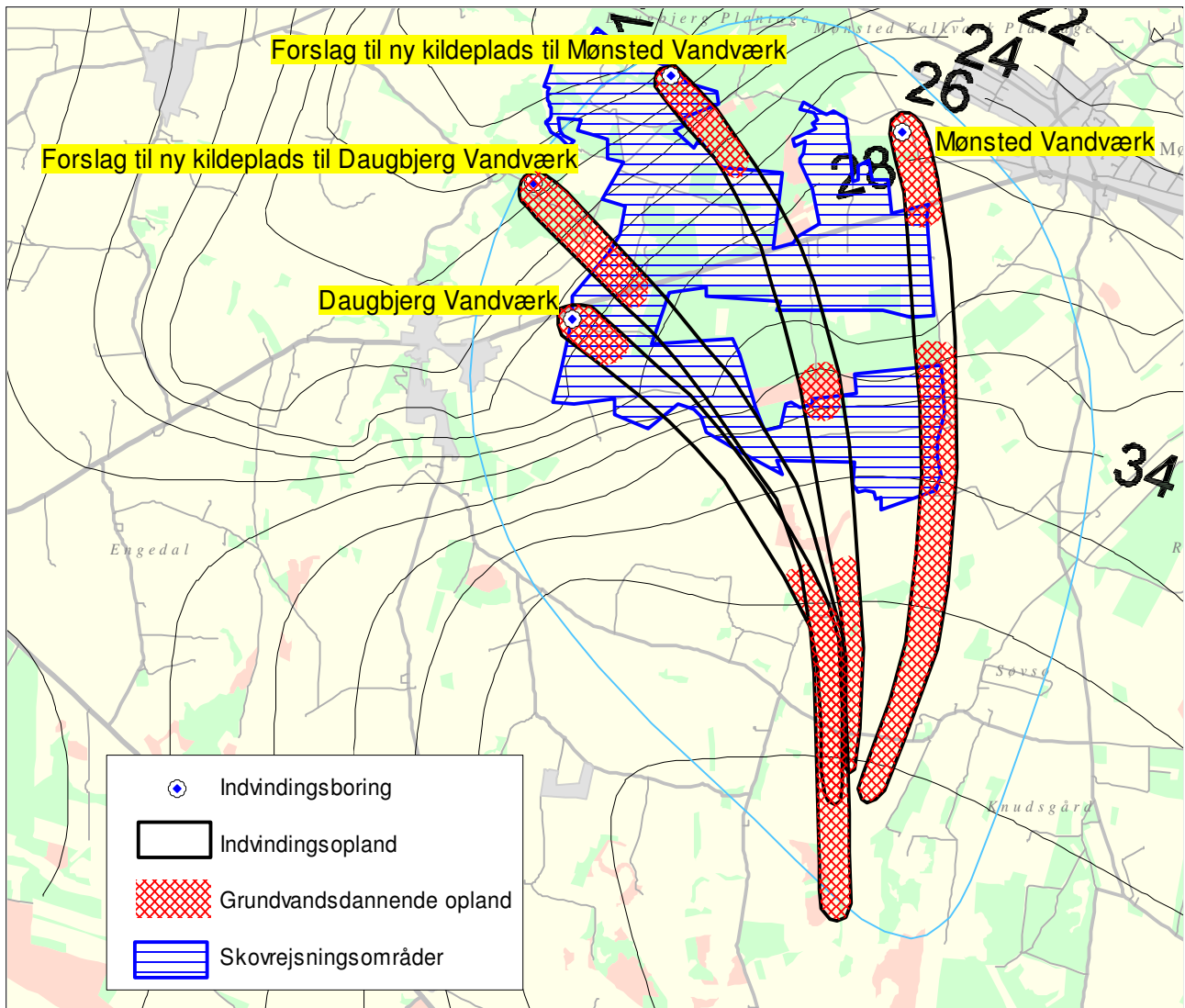
Den billigste og mest sikre indsatsplan overfor nitrat vurderes at være en flytning af vandværkernes kildepladser til Daugbjerg Plantage. Den dyreste indsatsplan vurderes at være en braklægning af en del af det grundvandsdannende opland til vandværkerne.

I scenarieberegningen hvor 1/3 af indvindingsoplandet braklægges svarer det til 8 ha for Mønsted Vandværk og til 5 ha for Daugbjerg Vandværk. Taget modelusikkerhed i betragtning vil det være nødvendigt at udpege et areal som minimum er ca. det dobbelt af det areal som grundvandsmodellen udpeger til at være det grundvandsdannende opland. Dvs. for Mønsted Vandværk ca. 16 ha og for Daugbjerg Vandværk ca. 10 ha. Benyttes modellen fra indsatsplanlægningen, hvor vandværket opkøber jorden, får tinglyst, at arealet kun fremover må bruges til vedvarende græs, og sælger arealet tilbage til landmanden til ca. en 1/3 af den oprindelige købspris vil udgifter for Mønsted Vandværk være 1,1 mill. kr. og for Daugbjerg Vandværk 650.000 kr. svarende til 1,5 kr/m³ i merudgift for den enkelte forbruger over en 10 årig periode.

Flyttes indvindingerne til plantageområdet vil de skønnede udgifter til ny kildeplads, ny ledninger og evt. ombygning på vandværket beløbe sig til 500.000-700.000 kr. for hvert af vandværkerne. Økonomisk betragtet vil en flytning af kildepladsen derfor være at foretrække. Problemet med flytningen af en kildeplads kan dog være at man støder på uforudsete vandkvalitetsproblemer i plantageområdet. Det kan være i form af naturligt forekommende stoffer – f.eks. kloroform eller arsen eller miljøfremmede stoffer fra ukendt forureninger. Dog viser vandanalyser fra borer i plantageområdet, at der ikke burde være vandkvalitetsproblemer.

Flyttes kildepladserne til plantageområdet kan indvindingerne fremtidssikres yderligere ved at udnytte regionplanes udpegede skovrejsningsområder. Områderne fremgår af Figur 52. De grundvandsdannende arealer til de foreslåede nye kildepladser som falder indenfor de udpegede skovrejsningsområder kan derfor med fordel tilplantes.

Daugbjerg Vandværk kan også etablere fælles kildeplads med Sjørup Vandværk (forslag fremsat af Daugbjerg Vandværk). Etableres kildepladsen i nærheden af Sjørup Vandværks nuværende kildeplads kan der dog ikke laves scenarieberegninger for denne, idet området ligger uden for grundvandsmodelområdet.



Figur 52. Skovrejsningsområder (udpeget i Regionsplanen), grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande.

Referencer

- /1/ H.J. Henriksen et al. 2001. Ståbi i grundvandsmodellering, GEUS rapport 2001/56
- /2/ WaterTech A/S. 2004. Opstilling af grundvandsmodel for Mønsted-Daugbjerg OSD.
- /3/ WaterTech A/S. 2005. Invers kalibrering af Mønsted-Daugbjerg grundvandsmodel
- /4/ WaterTech A/S. 2003. Geofysisk undersøgelse ved Mønsted.
- /5/ WaterTech A/S. 2004. Supplerende MEP undersøgelse i Mønsted-Daugbjerg OSD
- /6/ Infiltrations data beregnet for Viborg Amt af Hedeselskabet
- /7/ Christensen et al. (1998): Prediction of Regional Ground Water Flow to Streams. Ground Water Vol. 36, No. 2, March-April 1998.
- /8/ WaterTech A/S. 2005. Invers kalibrering af Mønsted-Daugbjerg grundvandsmodel.