Grundvandsmodel for kortlægningsområdet Tønder - Løgumkloster

Per Rasmussen & Torben O. Sonnenborg

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND, KLIMA-, ENERGI- OG BYGNINGSMINISTERIET



Grundvandsmodel for kortlægningsområdet Tønder - Løgumkloster

Per Rasmussen & Torben O. Sonnenborg



DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND, KLIMA-, ENERGI- OG BYGNINGSMINISTERIET

Indholdsfortegnelse

1.		Introduktion	5
2.		Modelområde	7
	2.1	Beskrivelse af modelområde	7
	2.2	Datagrundlag	8
	2.3	Pejledata	9
	2.4	Grundvandsindvinding	10
3.		Modelopsætning	13
	3.1	Modelsystem	13
	3.2	Randbetingelser	13
	3.2.1	Afgrænsning af modelområde	13
	3.2.2	Grundvandsdannelse	14
	3.2.3	Vandløb og dræn	15
	3.2.4	Grundvandsindvinding	17
	3.3	Diskretisering	
	3.4	Konvertering af geologisk model til grundvandsmodel	
	3.5	Kalibreringsdata	23
	3.6	Partikelbanesimuleringer	24
4.		Kalibreringsresultater	27
	4.1	Kalibreringsopsætning	27
	4.2	Resultater fra kalibreringen	
	4.3	Evaluering af modelkalibrering	31
	4.4	Validering	33
5.		Resultater	39
	5.1	Vandbalancer	39
	5.2	Resultater fra scenarium A	40
	5.2.1	Hydraulisk trykniveau	40
	5.2.2	Indvindingsoplande	43
	5.2.3	Grundvandsdannelse	43
	5.3	Resultater fra scenarium B (-25% grundvandsdannelse)	45
	5.3.1	Hydraulisk trykniveau	45
	5.3.2	Indvindingsoplande	
	5.4	Resultater fra scenarium C (+25% grundvandsdannelse)	
	5.4.1	Hydraulisk trykniveau	
	5.4.2	Indvindingsoplande	
	5.5	Resultater fra scenarium D (tilladt indvindingsmængde)	51
	5.5.1	Hydraulisk trykniveau	51
	5.5.2	Indvindingsoplande	54

	5.5.3	Grundvandsdannende oplande og transporttider	61
	5.5.4	Grundvandsdannelse	64
6.		Diskussion og konklusion	67
7.		Referencer	69

BILAG

Bilag 1. Beregning af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande ved hjælp af
partikelbanesimuleringer, scenarium D71
Bilag 2 . Grundvandets aldersfordeling beregnet ud fra partikelbaneberegninger 109
Bliag 3. Partikelbanesimuleringer med Groundwater Vistas (Version 6)

1. Introduktion

Denne rapport beskriver et udviklingsprojekt gennemført i et samarbejde mellem Naturstyrelsen og GEUS. Udviklingsprojektet omhandler opstilling af en 3D geologisk model, en hydrogeokemisk model og en grundvandsmodel for Tønder-området. Denne afrapportering vedrører alene opstillingen af grundvandsmodellen.

Målet med projektet har været at udvikle og implementere nye metoder, der konkret adresserer en række særlige geologiske forhold og deraf følgende udfordringer. I forhold til grundvandsmodellen har de særlige udfordringer bestået i at håndtere et voxel-grid på omkring 4 millioner voxler og 40 lithologier, som repræsenterer områdets komplekse geologi.

Der er opstillet en grundvandsmodel som omfatter kortlægningsområderne Tønder, Løgumkloster og Løgumgårde, Højer og Daler samt Rørkær-Jejsing kortlægningsområderne (Sandersen et al. 2010). Desuden er følgende kildepladser og vandværker omfattet af den hydrologiske modellering: Abild, Visby, Østerby-Gærup, Ballum, Borg, Bredebro, Rens og Sønder Sejerslev.

Grundvandsmodellen er baseret på den geologiske voxel-model udarbejdet af Jørgensen et al. (2014). I grundvandsmodellen er anvendt en horisontal diskretisering på 100 x 100 m, og en vertikal diskretisering på 1 - 8 m. Modelområdet dækker et område på 624,8 km². Grundvandsdannelsen er baseret på resultater fra DK modellen. Grundvandsindvinding er baseret på udtræk fra Jupiter databasen med input fra Naturstyrelsen og Tønder Kommune. Grundvandsindvinding til markvanding er baseret på aktuelle indberetninger til Jupiter databasen.

Der er gennemføret en kombination af automatisk parameterestimering og manuel kalibrering mod data for grundvandets trykniveau og for vandløbsafstrømningen. Den opstillede grundvandsmodel er en stationær model.

Grundvandsmodellen anvendes til bestemmelse af vandressourcens størrelse, til fastlæggelse af indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider til indvindingsboringer på i alt 15 kildepladser i modelområdet. Der er udført en usikkerhedsanalyse på grundvandsdannelse og grundvandsindvinding. Dette er sket dels ved at gennemføre modelberegninger med henholdsvis +25% og -25% af den gennemsnitlige grundvandsdannelse, og dels ved at gennemføre modelberegninger med den tilladte indvindingsmængde. I basismodelopsætningen er den aktuelle grundvandsindvinding for 2012 anvendt.

Til Bredebro Vandværk er der i en tidligere grundvandskortlægningsaktivitet beregnet indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider i til vandværkets boringer. Efterfølgende har vandværket etableret en ny indvindingsboring. Det har derfor været ønsket i forbindelse med nærværdende modelopsætning at få belyst om denne nye boring giver anledning til ændringer i placering og udstrækning af indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og i transporttider.

2. Modelområde

2.1 Beskrivelse af modelområde

Modelområdet er beliggende i den syd-vestligste del af Jylland, afgrænset mod vest af Vadehavet og mod syd af den dansk-tyske grænse. Mod nord forløber grænsen fra Ballum Enge i vest og nord om Nørre Løgum, mens østgrænsen forløber ved Øster Højst og Bylderup Bov.



Figur 2-1 Tønder modelområde, hvor placering af bakkeøer er angivet

Afgrænsningen af området er sket ud fra betragtninger omkring placeringen af OSDområder samt at grundvandsmodellen skal kunne beregne en velafstemt vandbalance.

Områdets topografi er domineret af tre terrænelementer: bakkeøer og de omkringliggende smeltevandssletter samt marskområdet mod sydvest. Bakkeøerne, som har ligget eksponeret siden den forrige istid (Saale), (Figur 2-1), udgør områdets højeste områder. Bakkeøerne har et uregelmæssigt terræn, som står i kontrast til de omkringliggende, flade smeltevandsletter. Smeltevandssletterne udgør et samlet areal, som forløber fra den gamle Weichsel isrand øst for modelområdet og vestover til Vesterhavet. Overordnet set har sletten et fald på omkring 1,2 o/oo mod vest.

Smeltevandssletten afvandes fra øst mod vest af et større system af vandløb.

Marsksletterne er lavtliggende mellem 0 til 2 meter over havet. Marskområdet er karakteriseret ved at være intensivt drænet.

2.2 Datagrundlag

Data for grundvandets trykniveau er indhentet dels fra 3 synkronpejlerunder, der dækker forskellige delområder (Orbicon – Leif Hansen A/S 2010, Rambøll 2012, Orbicon 2013, Rasmussen og Jensen 2015a) og dels fra Jupiter databasen. De 3 synkronpejlerunder har omfattet i alt 180 boringer indenfor modelområdet. Data indsamlet ved synkronpejlerunder er ved modelkalibreringen tillagt større vægt end øvrige pejledata. I alt 652 trykniveauob-servationer fra 604 boringer er anvendt til modelkalibreringen. Data hidrører fra perioden 1990-2013. 95 % af trykniveauobservationerne stammer fra boringer med filterplacering over kote -50 m.





Figur 2-2 Placering af vandløbsstationer samt afgrænsning af topografiske oplande til disse

Da en del af oplandet til de 3 vandløbsstationer ligger udenfor modelområdet er der beregnet afstrømning ud fra medianminimum ved de pågældende stationer og det tilhørende topografiske opland indenfor modelområdet (Tabel 2-1), (Ovesen et al. 2000).

Station	Areal (m ²)	Median Minimum (m ³ /d/m ²)	Afstrømning (m ³ /d)
Bredebro- Brede Å	134.259.988	0,0002419	32.480
Rørkær- Grønå	38.519.911	0,0003024	11.648
Emmerske- Vidå	49.715.267	0,0002678	13.316

Tabel 2-1Oplandsareal til vandløbsstationer, målt medianminimum og beregnet af-
strømning.

Oplandene til de 3 vandløbsstationer dækker 36 % at det samlede modelområde.

2.3 Pejledata

På Figur 2-3 ses et kontureret kort over grundvandets trykniveau baseret på modelresultater fra DK modellen. Den overordnede retning for grundvandsstrømningen er fra øst mod vest, med de højeste niveauer beliggende nord, nordøst og øst for Løgumkloster. Overordnet set følger grundvandets trykniveau terrænet. I marskområdet syd for Højer og vest for Møgeltønder er der en meget omfattende dræning, som holder det øvre grundvands trykniveau omkring kote 0. Figur 2-3 viser desuden placeringen af boringer med pejlinger af grundvandsstanden.



Figur 2-3 Boringer med pejledata og grundvandets trykniveau

2.4 Grundvandsindvinding

Figur 2-4 viser fordelingen og størrelsen af grundvandsindvindingen i modelområdet, gennemsnit for årene 1991-2010. Den totale grundvandsindvinding fra de 796 boringer i modelområdet var på 19 mio. m³/år. Hovedparten af de i alt 796 boringer er indvindingsboringer til markvanding. I modellen er der inkluderet 15 vandværker med i alt 32 indvindingsboringer (Figur 2-5 og Figur 2-6). Vandværksindvindingen spænder vidt fra Tønder Vandværk med en indvinding på 1,1 mio. m³ pr. år til Rens Vandværk med en årlig indvinding på 10.500 m³. Den samlede grundvandsindvinding fra de 15 vandværker var i 2012 på 2,7 mio. m³/år. Indvindingstilladelserne for disse vandværker er på tilsammen 3,1 mio. m³/år.



Figur 2-4 Fordelingen og størrelsen af grundvandsindvinding i modelområdet, indvinding pr boring, enhed: m³/år



Figur 2-5 Placering af 15 almene vandværker i modelområdet



Figur 2-6 Placering af indvindingsboringer tilhørende de 15 almene vandværker i modelområdet

3. Modelopsætning

3.1 Modelsystem

Den hydrologiske model (grundvandsmodellen) for undersøgelsesområdet er sat op ved brug af modelsystemet MODFLOW2000/GroundwaterVistas6. Til håndtering af den komplekse voxel-geologi er anvendt MODFLOW-modulet HUF (Hydrogeologic-Unit Flow). Til partikelbanesimuleringer (beregning af transporttider) er anvendt programmet MODPATH.

I GroundwaterVistas har det været nødvendigt at få videreudviklet dele af programmet til håndtering af input af voxel-geologien og til automatisk parameter estimering i kombination med HUF-pakken.

Den digitale højdemodel LIDAR DEM 16dm er anvendt til at definere topografien i området, herunder afgrænsning af de drænede områder i marsken.

3.2 Randbetingelser

3.2.1 Afgrænsning af modelområde

Det har ikke været muligt at definere naturlige hydrologiske grænser langs hele modelranden. Mod øst er modelranden derfor fastsat ud fra aktuelle målinger af grundvandets trykniveau, det vil sige som et fastholdt trykniveau. Der er anvendt 4 trykniveauer, for henholdsvis den nordlige og den sydlige del og for den øvre og de dybe dele af modellagene. Mod vest er modellen afgrænset af havet med et fastholdt trykniveau på 0 m. Såvel den nordlige som den sydlige modelrand er defineret som en nul-strømnings randbetingelse. Da grundvandsmodellen ikke inkludere saltvand og densitetsstrømning er der defineret en nul-strømningsrand mod sydvest under marsken (Figur 3-1). Dybden til saltvandsgrænsen er fastsat ud fra resistivitetsmålinger foretaget med SkyTEM, og der er valgt en afskæringsværdi på 7,5 ohm m (SkyTEM resistivitet).

Bunden af modellen er defineret af toppen af det palæogene ler, der i denne modelsammenhæng antages at være impermeabelt.



Figur 3-1 Dybde til saltvandsgrænse, som i modellen er implementeret som en nulstrømnings randbetingelse (fra Jørgensen et al. 2014)

3.2.2 Grundvandsdannelse

Grundvandsdannelsen er bestemt ud fra DK-modellens opsætning for Sydjylland. I DKmodellen er der anvendt klimagrid data fra DMI, hvor der er foretaget en dynamisk korrektion af nedbøren (Stisen et al. 2011). Den gennemsnitlige grundvandsdannelse i modelområdet i perioden 1991-2010 er på 394 mm/år. Enkelte steder ses en grundvandsdannelse på op til næsten 2 mm/dag eller 730 mm/år, typisk i højtliggende områder og mod øst i modelområdet. Modsvarende ses en mindre grundvandsdannelse i lavtliggende området langs vandløb og marskområdet, hvor fordampningen er større på grund af den større vandtilgængelighed (Figur 3-2).



Figur 3-2 Den gennemsnitlige grundvandsdannelsen for perioden 1991-2010 bestemt i DK-modellen (i m/dag)

3.2.3 Vandløb og dræn

Større vandløb i området er medtaget i modelopsætningen (Figur 3-3). Vandløbsstrækninger opstrøms vandløbsstationerne bidrager til vandbalancen for den pågældende vandløbsstation (Figur 2-2).



Figur 3-3 Placering af vandløb i modelopsætningen (de 'fede' farver). Med tynd grøn streg ses det samlede overordnede vandløbs- og drænsystem i modelområdet. Figur 3-4 viser dræn i modelopsætning

I den øvrige del af modelområdet er der indlagt dræn. I marskområdet er drændybden bestemt ud fra den digitale terrænmodel, og marskområdet er inddelt i 7 drænområder med hver sin specificerede drændybde. I den øvrige del af modelområdet er drændybden fastlagt som 1 meter under terræn (Figur 3-4).





Hvor grundvandsstanden når op over drænniveauet vil grundvandet strømme ud med drænene, ellers er drænene inaktive i modellen. Da vandføringen ved vandløbsstationerne er bestemt ud fra medianminimums vandføringer (afsnit 2.2) er drænafstrømningen i vandløbsoplandene ikke lagt til vandløbsafstrømningen, som i modellen er fundet via grundvandsindstrømning gennem vandløbsbunden. Medianminimumsvandføringen repræsenterer en sommervandføring, hvor det antages, at der ikke afledes vand med drænsystemet. Dette gælder givet vis ikke i marskområdet, men da der ikke er vandløbsstationer inkluderet i modellen til kalibrering fra dette område, er der set bort fra denne problemstilling.

3.2.4 Grundvandsindvinding

For vandværker og markvandingsanlæg med mere end 1 boring er indvindingsmængden fordelt ligeligt mellem alle aktive boringer tilhørende det aktuelle anlæg. I grundvandsmodellen er der inkluderet 15 vandværker med i alt 32 indvindingsboringer til hvilke der bestemmes indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande (Tabel 3-1). Herudover er der i grundvandsmodellen inkluderet 764 indvindingsboringer, som primært er boringer der avendes til markvanding. Den totale grundvandsindvinding fra de 796 boringer i modelområdet var på 19 mio. m³/år (afsnit 2.4)

For de 32 vandværksboringer er den gennemsnitlige filterdybde 50 m (kote -29 m). Abild Vandværk skiller sig ud med en indvindingsboring, som når ned i 170 m dybde.

Vandværk	DGU nr.	Kote	Filter top (kote)	Filter bund (kote)	Indvinding pr boring 2012 (m³/år)	Indvinding pr boring Tilladelse (m ³ /år)
Abild Vandværk	166. 711	12,91	-156,09	-162,09	43.467	55.000
Daler Vandværk	166. 603	10,06	-2,34	-5,34	12.333	15.000
Daler Vandværk	166. 728	9,95	-2,05	-8,05	12.333	15.000
Højer vandværk	166. 512	4,88	-10,82	-16,82	55.969	95.000
Højer vandværk	166. 548	4,99	-11,61	-17,61	55.969	95.000
Løgumgårde Vandværk	159. 1187	14,45	-4,55	-10,55	77.156	90.000
Løgumkloster Vandværk	159. 370	12,28	-2,72	-11,72	239.214	250.000
Løgumkloster Vandværk	159. 478	12,16	-3,34	-11,34	239.214	250.000
Rørkær - Jejsing vv, Kipkærvej	167. 1559	6,97	-6,03	-10,03	55.249	48.000
Rørkær - Jejsing vv, Kærvej	167. 1562	7,99	-11,01	-17,01	34.989	52.000
Tønder Vandværk	166. 435	12,12	-29,88	-39,88	143.125	162.500
Tønder Vandværk	166. 446	12,16	-1,84	-11,84	143.125	162.500
Tønder Vandværk	166. 462	10,70	-21,30	-35,30	143.125	162.500
Tønder Vandværk	166. 467	14,86	-1,14	-16,14	143.125	162.500
Tønder Vandværk	166. 469	15,78	-17,72	-29,72	143.125	162.500
Tønder Vandværk	166. 470	15,43	1,23	-16,57	143.125	162.500
Tønder Vandværk	166. 759	16,18	-3,82	-28,82	143.125	162.500
Tønder Vandværk	166. 763	15,14	-7,86	-19,86	143.125	162.500
Visby Vandværk	158. 618	15,97	-4,03	-10,03	41.971	42.500
Visby Vandværk	158. 683	15,94	-5,56	-11,56	41.971	42.500
Østerby-Gærup Vandværk	166. 511	14,91	4,91	-1,09	18.495	20.000
Østerby-Gærup Vandværk	166. 724	14,41	4,41	-1,59	18.495	20.000
Ballum Vandværk	158. 614	9,34	-31,66	-37,66	82.999	100.000
Ballum Vandværk	158. 834	8,92	-32,08	-38,08	82.999	100.000
Borg Vandværk	158. 621	16,99	-22,01	-28,01	5.224	6.000
Borg Vandværk	158. 622	16,99	-22,01	-28,01	5.224	6.000
Bredebro Vandværk	158. 841	9,96	-58,04	-70,04	113.165	137.500
Bredebro Vandværk	158. 966	10,73	-57,27	-69,27	113.165	137.500
Rens Vandværk	167. 1443	12,90	-38,10	-44,10	20.465	24.000
Sdr. Sejerslev Vandværk	158. 817	16,75	-13,25	-19,25	53.260	55.000
Sdr. Sejerslev Vandværk	158. 818	16,71	-8,29	-20,29	53.260	55.000
Sdr. Sejerslev Vandværk	158. 937	16,66	-8,94	-20,94	53.260	55.000

Tabel 3-1Årlig grundvandsindvinding fra 15 vandværker, indvinding i 2012 og tilladtindvindingsmængde

3.3 Diskretisering

Modellen er diskretiseret i et grid på 100 x 100 m i det horisontale plan. I den vertikale retning varierer tykkelsen af de 82 modellag mellem 1 meter og 8 meter. Bunden af det øverste modellag er fastlagt ved grundvandsspejlet minus 1 meter. Ned til kote -5 m består modellen af 6 beregningslag med en minimumstykkelse på 1 m. Modellag 2-5 har samme tykkelse. Tykkelsen af modellag 2-5 varierer indenfor modelområdet. Herunder er modellagene tilnærmelsesvis horisontale med en tykkelse på 5 m indtil lag 21 i kote -80 m, herunder og ned til modellens bund er lagtykkelsen 8 m (Figur 3-5). Grundvandsmodellen består af 2.923.734 aktive celler.



Figur 3-5 Modelgrid og modellag

3.4 Konvertering af geologisk model til grundvandsmodel

Den geologiske model for området er udarbejdet som en voxel-model med grid-celler på 100 x 100 x 5 m. En detaljeret beskrivelse af den geologiske model findes i Jørgensen et al. (2014). Geologien blev tolket i 40 lithologiske enheder som i grundvandsmodellen er konverteret til 40 unikke hydraulisk ledningsevne zoner (Tabel 3-2).

Tabel 3-2 Hydraulisk ledningsevne zoner i grundvandsmodel og lithologiske enheder. 'SSV %' angiver det procentvise indhold af ler i den pågældende geologiske enhed. 'SGEMS' betegner en stokastisk modellering og 'SSV' en geostatistisk metode til geologisk modellering (Jørgensen et al. 2014)

GV zoner	VALUE	CODE	Color	TEXT
1		id		not defined voxel
2	2	SGI		SGEMS clay
3	1	SGs		SGEMS sand
4	401	SV 10		SSV 0-10%
5	402	SV 20		SSV 10-20%
6	403	SV 30		SSV 20-30%
7	404	SV40		SSV 30-40%
8	405	SV 50		SSV 40-50%
9	406	SV60		SSV 50-60%
10	407	SV 70		SSV 60-70%
11	408	SV80		SSV 70-80%
12	409	SV90		SSV 80-90%
13	410	SV100		SSV_100%
14	571	PG		Post_glacial
15	572	PS		Sandur
16	573	SG		Late_glacial
17	574	EM		Eem
18	586	MADe		MaadeGroup_deforme
19	576	MA		MaadeGroup
20	577	O D3		Odderup_\$3
21	578	AR3		Arnum_L3
22	579	O D2		Odderup_\$2
23	580	AR2		Arnum_L2
24	585	KLI10		Klintinghoved_Clay_Upper_10
25	581	BAS		Bastrup_Sand
26	582	KLI9		Klintinghoved_Clay_Lower_9
27	601	qs		Quaternary_Sand
28	602	ql		Quaternary_Clay
29	590	LG1_DS		Abild_Valley_Sand
30	591	Clay		Abild_Valley_Clay
31	593	SAND		Hoejer_Valley_Sand
32	592	Clay		Hoejer_Valley_Clay
33	595	Clay		Toender_Jejs_Valley_Clay
34	596	SAND		MoegelToender_Valley_Sand
35	597	Clay		MoegelToender_Valley_Clay
36	599	SAND		Toender_Jejs_Valley_Sand_Upper
37	603	QsedSA		QuartenarySediments_Saltwater
38	598	SAND		LoegumKloster1_Valley_Sand
39	622	Q_MC		Q_MC
40	625	SAND		MoegelToender Valley Upper Sand

Figur 3-6 og Figur 3-7 viser for udvalgte dybder og profiler eksempler på visualisering af den geologiske model importeret til grundvandsmodellen.



Figur 3-6 Den geologiske model importeret til grundvandsmodellen, Vest-øst profil og modellag 14, svarende til kote 0 m. Farveskalalen for de lithologiske enheder fremgår af Tabel 3-



Figur 3-7 Den geologiske model importeret til grundvandsmodellen, vest-øst profil og modellag 50, svarende til kote -185 m. Farveskalalen for de lithologiske enheder fremgår af Tabel 3-2

Da den geologiske voxel model er udarbejdet med horisontale lag, har det været nødvendigt at foretage nogle modifikationer ved overførslen af den geologiske model til grundvandsmodellen. Det vedrører primært beregningslagene tættest på terræn i grundvandsmodellen. Som beskrevet i afsnit 3.3 er lagdelingen i grundvandsmodellen tilpasset på en sådan måde at grundvandsspejlet er beliggende i det øverste modellag. For i videst muligt omfang at udnytte den geologiske information fra voxel modellen i grundvandsmodellen er der anvendt den såkaldte HUF-pakke til MODFLOW (Anderman og Hill 2000). I HUF-pakken fastsættes værdier for de hydrogeologiske parametre for de enkelte geologiske enheder, voxlerne. Ved hjælp af HUF-pakken beregnes de hydrauliske parametre med et vægtet gennemsnit for hver celle og lag i grundvandsmodellen. På denne måde overføres og bevares den geologiske information fra den geologiske model til grundvandsmodellen.

For at mindske beregningstiden for grundvandsmodellen er tykkelsen af beregningslagene under kote -85 m øget til 8 m. Karakteristika for den geologiske model (voxel modellen) og grundvandsmodellen i ses i Tabel 3-1. Antallet af voxler i den geologiske model som angivet i Tabel 2-3 repræsenterer den geologiske model over toppen af paleogen, dvs. den del af den geologiske model som er anvendt i grundvandsmodellen. Hele den geologiske model, som også omfatter paleogen og top af kalk, består af betydeligt flere voxler (Jørgensen et al. 2014).

	Geologisk model	Grundvandsmodel
Antal voxler / grid	3.963.673	2.911.453
Grid størrelse	100 x 100 m	100 x 100 m
Antal modellag	124	82
Lagtykkelse	5 m	1 – 8 m

 Tabel 3-1
 Karakteristika for geologisk model og grundvandsmodel

3.5 Kalibreringsdata

Figur 3-8 viser placeringen af de anvendte grundvandspejlinger til kalibrering af grundvandsmodellen. Hovedparten af pejlingerne hidrører fra boringer med filtre placeret over kote -50 m. Data er dels indsamlet ved 3 synkronpejlerunder og dels ved udtræk fra Jupiter databasen. Data fra synkronpejlerunder vurderes at være godt bestemt med en lille usikkerhed, hvorimod pejledata udtrukket fra Jupiter databasen vurderes at være behæftet med en større usikkerhed. Pejledata fra synkronpejlerunder er tildelt en usikkerhed på 2 m, hvorimod pejlinger udtrukket fra Jupiterdatabasen er tildelt en usikkerhed på 4 m. Da der findes meget få pejlinger fra dybere boringer er disse også tildelt en lille usikkerhed for at få disse til at vægte relativt højt ved parameterestimeringen. Enkelte pejledata er frasorteret på grund af urealistiske værdier.

Beregnede afstrømningsdata fra 3 vandløbsstationer er desuden anvendt i modelkalibreringen (afsnit 2.2, Figur 2-2).



Figur 3-8 Placering af boringer med grundvandspejlinger benyttet i modelkalibreringen

3.6 Partikelbanesimuleringer

Indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider til vandværkernes indvindingsboringer er bestemt ved partikelbanesimuleringer. Der er anvendt programmet MODPATH, som beregner partikelbaner ud fra hastighedsvektorer bestemt af strømningsmodellen MODFLOW.

Der er anvendt såvel opstrøms (reverse) som nedstrøms (forward) partikelbane simuleringer til bestemmelse af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande. Transporttiden til de enkelte indvindingsboringer til vandværkerne er bestemt ved at placere to koncentriske cirkler med en radius på henholdsvis 25 m og 100 m omkring den enkelte indvindingsboring og centralt i forhold til boringens filterdybde. Fra hver cirkel frigives 100 partikler ved en opstrøms partikelbanesimulering, og den advektive transporttid beregnes fra boringens filter til modellens øverste vandførende lag. Der er således ikke taget hensyn til vandets transporttid gennem den umættede zone. For kildepladser med to eller flere indvindingsboringer i samme beregningsceller er der kun placeret et sæt partikelcirkler pr gruppe boringer. Der er anvendt en værdi for porøsitet på 0,25 for alle geologiske enheder.

Indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande er bestemt ved nedstrøms partikelbanesimuleringer. Her er der placeret 9 eller 16 partikler, afhængigt af oplandets størrelse, i hver grid celle i modellens øverste aktive lag. Startpunktet for partikler, som ender i indvindingsboringen, udgør det grundvandsdannende opland, og partiklernes strømningsbaner fra grundvandsdannelse til filter udgør indvindingsoplandet til den enkelte boring. I Bilag 1 er partikelbaneberegningerne nærmere beskrevet og der er vist detaljerede figurer af partikelbaneberegninger af indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider for scenarium D.

I Bilag 3 beskrives hvordan partikelbanesimuleringer gennemføres med Groundwater Vistas, version 6.

4. Kalibreringsresultater

4.1 Kalibreringsopsætning

Til en start blev grundvandsmodellen kalibreret ved en automatisk parameterestimering af de hydrauliske ledningsevner ved benyttelse af programmet PEST (Doherty 2005). Grundvandsmodellen blev kalibreret op i mod grundvandspejlinger og afstrømningsdata (afsnit 3.5) For at lette kalibreringsprocessen blev der foretaget en gruppering af de 40 lithologiske enheder i 8 hydrofacies. Fremgangsmåden er beskrevet af Jørgensen et al. (2014) og gengivet her:

Estimeringen af de 8 hydrofacies er foretaget ved at gennemgå en tre-trins metode:

1. Opdeling i henholdsvis kvartære (Q) og prækvartære (P) enheder. På grund af store forskelle i aflejringsmiljøerne er det forventeligt, at en prækvartær sand-enhed vil have en anden hydraulisk ledningsevne (K-værdi) end en kvartær sand-enhed.

2. Opdeling i henholdsvis sand (S) og ler (C): De geologiske enheder fra henholdsvis kvartær og præ-kvartær opdeles i sand og ler.

3. Høj- (H) og lav-permeable (L) enheder (K-værdier): Der foretages en vurdering af, om de definerede sand- og ler-enheder har en relativ høj eller en relativt lav hydraulisk ledningsevne.

Den hydrauliske ledningsevne afhænger af kornstørrelse og af sorteringsgraden. Med hensyn til sorteringsgraden (og på lidt større skala, homogeniteten) er det forventeligt, at en homogen sand-enhed vil have en relativt høj K-værdi, mens en homogen ler-enhed vil have en relativt lav K-værdi. Det vil sige at hvis der er tale om en heterogen sand-lithologi, er det forventeligt, at den hydrauliske ledningsevne er relativt lav (sammenlignet med homogent sand). Omvendt, hvis der er tale om en "rodet" ler-lithologi, er det forventeligt, at den hydrauliske ledningsevne er relativt høj (sammenlignet med homogent ler). Metoden blev benyttet systematisk for alle lithologiske enheder i modellen, hvilket resulterede i en fordeling som vist i Tabel 4-1 og Tabel 4-2

Tabel 4-1 Tabellen angiver antallet af voxler for de overordnede K-enheder, der er brugt i grundvandsmodellen. Q står for kvartære sedimenter, P for prækvartære sedimenter. C står for ler, S for sand. H står for høj hydraulisk ledningsevne, og L står for lav hydraulisk ledningsevne. Således står f.eks. "QCH" for kvartært ler med høj hydraulisk ledningsevne.

	Kvartært ler		Prækvar	artært ler Kvartæ		rt sand	Prækvartært sand	
K-								
enhed	QCH	QCL	PCH	PCL	QSH	QSL	PSH	PSL
Antal								
voxler	293.573	184.773	1.476.399	652.820	407.059	365.011	116.329	478.043

Som det fremgår af Tabel 4-1 er der en om ikke ligelig fordeling af voxler imellem de enkelte hydrofacies så dog et acceptabelt antal voxler i alle kategorier, som giver forhåbning om, at denne opdeling kan benyttes ved den automatiske parameterestimering. I Figur 4-1 er forenklingen fra 40 lithologiske enheder til 8 hydro-facies illustreret.



Figur 4-1 To vest-øst profilsnit som illustrerer forenklingen fra a. 40 lithologiske enheder til b. 8 hydro-facies (modelrække 172)

Det viste sig dog ikke muligt at estimere realistiske hydrauliske ledningsevner for de lerede enheder. Derfor blev den endelige kalibreringsproces en kombination af manuel kalibrering ("trial-and–error") for de fire lerede enheder og en automatisk parameter estimering for de fire sande enheder (Tabel 4-1).

Som startværdier i kalibreringsfasen blev der skelet til litteraturværdier fra grundvandsmodelopsætninger i nærliggende områder og områder med sammenlignelige geologiske forhold (Tabel 4-3) og til prøvepumpningsdata fra området (Rasmussen 2015b).

GV	VALUE	CODE	Color	ТЕХТ	Hydro-
zone					facies
21	578	AR3		Arnum_L3	PCH
23	580	AR2		Arnum_L2	PCH
24	585	KLI10		Klintinghoved_Clay_Upper_10	PCH
26	582	KLI9		Klintinghoved_Clay_Lower_9	PCH
18	586	MADe		MaadeGroup_deforme	PCL
19	576	MA		MaadeGroup	PCL
2	2	SGI		SGEMS clay	QCH
9	406	SV60		SSV 50-60%	QCH
10	407	SV70		SSV 60-70%	QCH
11	408	SV80		SSV 70-80%	QCH
28	602	ql		Quaternary_Clay	QCH
32	592	Clay		Hoejer_Valley_Clay	QCH
33	595	Clay		Toender_Jejs_Valley_Clay	QCH
39	622	Q_MC		Q_MC	QCH
12	409	SV90		SSV 80-90%	QCL
13	410	SV100		SSV_100%	QCL
17	574	EM		Eem	QCL
30	591	Clay		Abild_Valley_Clay	QCL
35	597	Clay		MoegelToender_Valley_Clay	QCL
37	603	QsedSA		QuartenarySediments_Saltwater	QCL
25	581	BAS		Bastrup_Sand	PSH
20	577	OD3		Odderup_S3	PSL
22	579	OD2		Odderup_S2	PSL
1		id		no defined voxel	QSH
4	401	SV10		SSV 0-10%	QSH
5	402	SV20		SSV 10-20%	QSH
15	572	PS		Sandur	QSH
16	573	SG		Late_glacial	QSH
27	601	qs		Quaternary_Sand	QSH
29	590	LG1_DS		Abild_Valley_Sand	QSH
34	596	SAND		MoegelToender_Valley_Sand	QSH
38	598	SAND		LoegumKloster1_Valley_Sand	QSH
40	625	SAND		MoegelToender_Valley_Upper_Sand	QSH
3	1	SGs		SGEMS sand	QSL
6	403	SV30		SSV 20-30%	QSL
7	404	SV40		SSV 30-40%	QSL
8	405	SV50		SSV 40-50%	QSL
14	571	PG		Post_glacial	QSL
31	593	SAND		Hoejer_Valley_Sand	QSL
36	599	SAND		Toender Jejs Valley Sand Upper	QSL

 Tabel 4-2
 Gruppering af de lithologiske enheder i 8 hydrofacies

Grindsted			Bording			Vidå		
Geol.	Kx (m/d)	Kx (m/s)	Geol.	Kx (m/d)	Kx (m/s)	Geol.	Kx (m/d)	Kx (m/s)
kvartær	35,625	4,12E-04	kvartær	9,504	1,10E-04	kvartært sand	44,323	5,13E-04
						kvartært ler	0,010	1,20E-07
odderup	39,715	4,60E-04	odderup	14,688	1,70E-04	kvartssand	36,634	4,24E-04
arnum-ø	0,016	1,90E-07	bastrup	57,888	6,70E-04	glimmersand	56,592	6,55E-04
internt sand	1,468	1,70E-05	billund	55,296	6,40E-04			
arnum-n	0,011	1,27E-07						
bastrup	26,362	3,05E-04	fasterholt/arnum	7,08E-02	8,20E-07			
klintehoved	0,016	1,81E-07						
billund	1,381	1,60E-05						
vejlefjord	1,32E-05	1,52E-10						
(Grontmij, 2010)			(Seifert et al., 200	8)		(Rasmussen et al., 2012)		
Ølgod			Ølgod			Egebjerg		
Geol.	Kx (m/d)	Kx (m/s)	Geol.	Kx (m/d)	Kx (m/s)	Geol.	Kx (m/d)	Kx (m/s)
kvartært sand	2,000	2,31E-05	kvar.sand1.1	3,860	4,47E-05	ds	3,345	3,87E-05
kvartært ler	0,090	1,04E-06	kvar.sand1.2	0,864	1,00E-05	ml	8,64E-04	1,00E-08
			kvar.clay1.1	4,61E-04	5,34E-09			
prækvartært sand	4,600	5,32E-05	mioc.sand	6,000	6,94E-05	gl	0,069	7,99E-07
prækvartært ler	0,005	5,79E-08	mioc.clay	5,50E-03	6,37E-08			
paleogene ler	8,64E-04	1,00E-08						
(He et al., 2013)			(Sonnenborg og H	e, 2012)		(Henriksen og	Troldborg,	, 2011)

Tabel 4-3 Litteraturværdier for hydrauliske ledningsevner

Tabel 4-4	Startværdier for hydraulisk ledningsevne for 8 hydro-facies, Kx: horisontale
ledningsev	ner og Kz: vertikale ledningsevner (Kx = Ky)

Hydro-facies	Kx (m/d)	Kx (m/s)	Kz (m/d)	Kz (m/s)
PCH	0,4320	5,00E-06	0,04320	5,00E-07
PCL	0,0864	1,00E-06	0,00864	1,00E-07
QCH	0,4320	5,00E-06	0,04320	5,00E-07
QCL	0,0864	1,00E-06	0,00864	1,00E-07
PSH	43,2000	5,00E-04	4,32000	5,00E-05
PSL	35,4000	4,10E-04	3,54000	4,10E-05
QSH	5,5000	6,37E-05	0,55000	6,37E-06
QSL	0,8640	1,00E-05	0,08640	1,00E-06

4.2 Resultater fra kalibreringen

Ved den automatiske parameterestimering er der bestemt hydrauliske ledningsevner for de sandede lithologier (Tabel 4-5). De kvartære sandenheder er bestemt med god præcision (dvs. snævre 95% konfidensintervaller), hvorimod især prækvartært sand med høj hydraulisk ledningsevne (PSH) er bestemt med større (stor) usikkerhed. Dette skyldes primært, at der er få pejlinger til rådighed i de dybe præ-kvartære lag (se afsnit 2.2).

Hydro-facies	Estimatet værdi (m/d)	95% procent konfidensinterval		
		Nedre grænse	Øvre grænse	
PCH	fixed	-	-	
PCL	fixed	-	-	
QCH	fixed	-	-	
QCL	fixed	-	-	
PSH	10,303	0,726	146,232	
PSL	5,182	1,369	19,621	
QSH	4,169	3,584	4,849	
QSL	4,759	2,733	8,285	

Tabel 4-5 Automatisk parameter estimering af de sandede hydro-facies

Ved en manuel kalibrering er de hydrauliske ledningsevner for de lerede lithologier bestemt. Der er anvendt en anisotropi faktor på 10 mellem den horisontale hydrauliske ledningsevne (Kx) og den vertikale hydrauliske ledningsevne (Kz), Tabel 4-6.

Hydro-facies	Kx (m/d)	Kx (m/s)	Kz (m/d)	Kz (m/s)
PCH	0,0432	5,00E-07	0,0043	5,00E-08
PCL	0,0065	7,50E-08	0,0006	7,50E-09
QCH	0,4320	5,00E-06	0,0432	5,00E-07
QCL	0,0648	7,50E-07	0,0064	7,50E-08
PSH	10,303	1,19E-04	1,030	1,19E-05
PSL	5,182	6,00E-05	0,518	6,00E-06
QSH	4,169	4,82E-05	0,416	4,82E-06
QSL	4,759	5,51E-05	0,475	5,51E-06

 Tabel 4-6
 Horisontale (Kx) og vertikale (Kz) ledningsevner for de enkelte hydro-facies

4.3 Evaluering af modelkalibrering

Figur 4-2 viser plot af observerede pejledata i forhold til modellerede. Data grupperer sig pænt omkring 1:1 linjen med nogle enkelte punkter som ligger markant under linjen, dvs. at der er modelleret en væsentlig lavere værdi end observeret. Dette kan skyldes, at feltmålinger er foretaget i en situation uden pumpning, hvorimod grundvandsmodellen har beregnet trykniveauet i en pumpesituation. Dette kan især være situationen i et område som dette med mange markvandingsboringer, som i nærværende stationære modelopstilling er tildelt en konstant pumpeydelse.



Figur 4-2 Observerede trykniveauer i forhold til modellerede trykniveauer

Den geografiske spredning i forskellen mellem observerede og modellerede trykniveauer fremgår af Figur 4-3. Både positive værdier, hvor de observerede værdier er større end de modellerede, og negative værdier, hvor de observerede værdier er mindre end de modellerede, kan findes i området. Mod øst ses en tendens til, at der simuleres for lave trykniveauer i forhold til de observerede niveauer. Ellers er positive og negative værdier relativt tilfældigt fordelt, hvilket indikerer at modellen ikke er systematisk fejlbehæftet..

I Geo-vejledning nr. 7 (Refsgaard et al. 2010) er der opstillet kvantitative nøjagtighedskriterier til brug for kalibrering og validering for modelsimulering (Tabel 4-7).

	Kriterium	Screening	Overslags-	Detailmodel-	
			beregning	lering	
1	β1 (ME/dH _{max})	0,05	0,025	0,01	
2 og 3	$\beta 2 (RMS/S_{obs})$	2,6	2	1,65	
4	β3 (RMS/dH _{max})	0,1	0,05	0,025	

Tabel 4-7	Nøiagtighedskriterier for	modelkalibrering	(Refsgaard et al. 20	010)
			(,

ME: Middelfejl. RMS: Kvadratafvigelsessum. d H_{max} : Maksimal trykniveauforskel. S_{obs}: Standard-afvigelse på observationsdata.

Ved den endelige kalibrering er der opnået en middelfejl og en kvadratafvigelsessum på henholdsvis ME = 0,18 m og RMS = 1,77 m. Den maksimal trykniveauforskel dH_{max} = 25,35 m og standardafvigelse på observationsdata S_{obs} = 2 til 4 m. Der er dermed opnået følgende kalibreringsværdier jf. nøjagtighedskriterierne i Tabel 4-7: β 1 = 0,007; β 2 = 0,89 og β 3 = 0,07. Dette er tilfredsstillende i forhold til de opstillede kriterier i Geo-vejledning nr. 7 (Refsgaard et al. 2010).



Figur 4-3 Geografisk placering og størrelse af afvigelser mellem observerede og modellerede trykniveauer

4.4 Validering

Fra vandværksboringen i Abild (DGU nr. 166.711,

Figur 4-5) er der bestemt C-14 alder af grundvandet i 2 af boringens filtre i 2009. I Tabel 4-8 ses en sammenligning af denne aldersbestemmelse med transporttiden bestemt ved opstrøms partikelbane simulering med grundvandsmodellen.

Partikelbanesimuleringerne er gennemført for 2 forskellige set-up for placering af partikler. Ved første set-up er der placeret 100 partikler i en cirkel med radius på 25 m omkring det aktuelle filter. Denne opsætning er benyttet i beregning 1, 3 og 6 (Tabel 4-8). Ved andet set-up er der placeret 50 partikler i en cirkel med radius på 25 m og 50 partikler i en radius på 100 m omkring det aktuelle filter. Denne opsætning er benyttet i beregning 2, 4 og 7 (Tabel 4-8). For indtag 1 er partiklernes startposition modellag 36 og for indtag 3 i modellag 28. For indtag 2 er partiklerne fordelt ligeligt mellem modellag 30 og 31, da indvindingsfilteret strækker sig over begge disse modellag.

For indtag 2, hvorfra der sker en oppumpning af grundvand, er der desuden foretaget en nedstrøms partikelbaneberegning. Ved den nedstrøms beregning er der placeret 16 partikler i hvert grid i modellag 1, og de partikler som ender i det aktuelle filter er udvalgt til bestemmelse af transporttiden. Resultatet af den nedstrøms beregning ses i Tabel 4-8 beregning 5.

Tabel 4-8	Målt C-14 alder af grundvand og modelberegnet transporttid for grundvand til
indtag i bo	ring DGU nr. 166.711, Abild Vandværk

Boring	Ind- tag	Filter top (m u.t.)	Pump- ning	C-14 Alder (år)	Partikel- bane alder, middel (år)	Partikel- bane alder, median (år)	Std. afv.	Bereg reg- ning nr. *
166.711	1	202	Nej	6740 ±60	1165	887	970	1
					1461	871	1687	2
166.711	2	159	Ja	-	944	405	1378	3
					1184	455	2209	4
					1109	472	1652	5
					•	•		
166.711	3	138	Nej	6365 ±75	314	313	8	6
					329	317	26	7

* Forklaring til "Beregning nr." fremgår at tekst.

Som det fremgår af Tabel 4-8 er der en stor forskel på grundvandsalder bestemt ved C-14 metoden og grundvandets transporttid bestemt ved partikelbane simulering. Tidligere studier har vist at grundvandsaldre bestemt ved C-14 metoden skal korrigeres betydeligt ned afhængigt af de hydro-geokemiske forhold (Scharling, 2011).

For de 2 dybeste filtre, indtag 1 og 2, ses af Tabel 4-8 at den bestemte middelalder er højere ved det partikelbane set-up, hvor der er benyttet 2 start radier på henholdsvis 25 m og 100 m for partikelplaceringer (beregning 2 og 4) i forhold til kun en start radius på 25 m (beregning 1 og 3), ligesom spredningen er større. For det mest terrænnære filter, indtag 3, ses ingen væsentlig forskel ved de 2 partikelbane set-up (beregning 6 og 7). For de 2 filtre, hvorfra der ikke pumpes, ses ingen betydelig forskel i mellem de 2 set-up på medianværdierne for aldrene (beregning 1 og 2 samt 6 og 7).

For det filter, hvorfra der pumpes, indtag 2, ses at der er bedre overensstemmelse mellem grundvandets alder bestemt ved opstrøms partikelbanesimuleringer med 2 start radier på henholdsvis 25 m og 100 m og den nedstrøms beregning af alderen, henholdsvis beregning 4 og 5, i forhold til beregning 3 (Tabel 4-8).

Standardafvigelsen er væsentlig større for de 2 dybere filtre, indtag 1 og 2, og dækker over, at en (mindre) del at det grundvand, der strømmer til boringen har en meget lang transportvej og dermed transporttid (Figur 4-4).



Figur 4-4 Opstrøms partikelbanesimuleringer til bestemmelse af grundvandets alder for Abild Vv. boring 166.711, indtag 1, 2 og 3 (i1, i2, i3). Figurer i venstre kolonne viser simuleringer med en startposition for partiklerne i en radius på 25 m omkring indtaget, højre kolonne: start radius for partikler er 25 m og 100 m. Sorte prikker viser partiklernes endepunkt i modellag 1. Grid størrelsen er 100 m x 100 m.



Figur 4-5 Boringer hvorfra der foreligger aldersdatering af grundvandet. Abild Vandværk: 166.711, Abild GRUMO-område: 158.777 og 166.674

Indenfor modelområdet findes et grundvandsovervågningsområde, Abild GRUMO-område, hvor der i 2 boringer med tilsammen 6 filtre (indtag) er bestemt grundvandsaldre ved CFCdatering (Tabel 4-9) og Tritium-datering (Tabel 4-10), (Figur 4-5).

		Mode	elsimulerir	nger						
DGU nr.	Ind- Filt top Filt bund Prøve- Kor			Konc.	Alder	Alder	Alder	Std.		
	tag	(mut)	(mut)	tagning	(årstal)	(år)	middel	median	afv.	
				(år)			(år)	(år)		
158. 777	4	7,5	8,5	1998	1963	35	4,1	4,1	0,1	
158. 777	3	14,5	15,5	1998	1965	33	8,2	8,4	0,5	
158. 777	2	19,5	20,5	1998	1963	35	13,7	13,7	0.3	
158. 777	1	27,0	28,0	1998	1971	27	22,8	21,6	2,1	
166. 674	2	17,0	18,0	1998	1950	48	8,9	8,8	0,3	
166. 674	1	23,0	24,0	1998	1955	43	15,3	15,4	0,3	

Tabel 4-9CFC-datering fra 2 overvågningsboringer, DGU nr. 158.777 og 166.674, AbildGRUMO-område, og modelberegnet transporttid til boringer

Her ses en væsentlig bedre overensstemmelse mellem grundvandsaldre bestemt ved vandanalysedatering og modelsimuleringer. Der er dog et generelt billede af at partikelbane simuleringerne viser en yngre alder af grundvandet i forhold til dateringerne. Det skal imidlertid bemærkes, at transporttiderne gennem den umættede zone ikke er inkluderet i modelberegningerne, og at den beregnede alder derfor er nogle år for lav. Partikelbane simuleringerne viser en forventelig stigende alder med dybden i modsætning til dateringerne, som viser mere ens aldre af grundvandet uafhængigt af prøvetagningsdybden for de undersøgte filtre. Alle filtre er relativt terrænnære i dybder fra 7,5 til 28 m under terræn.

Tritium-datering									lsimulerin	ger
DGU nr.	DGU nr. Ind- Filt Filt Prøve- Konc En Alder							Alder	Alder	Std.
	tag	top	bund	tagning		hed	(år)	middel	median	afv.
		(mut)	(mut)	(år)				(år)	(år)	
158. 777	4	7,5	8,5	1995	18,0	TU	<40	4,1	4,1	0,1
158. 777	3	14,5	15,5	1995	24,8	TU	<40	8,2	8,4	0,5
158. 777	2	19,5	20,5	1995	20,8	TU	<40	13,7	13,7	0.3
158. 777	1	27,0	28,0	1995	10,8	TU	<40	22,8	21,6	2,1
166. 674	2	17,0	18,0	1996	7,0	TU	<40	8,9	8,8	0,3
166. 674	1	23,0	24,0	1996	1,8	TU	>40	15,3	15,4	0,3

Tabel 4-10Tritium-datering fra 2 overvågningsboringer, DGU nr. 158.777 og 166.674,Abild GRUMO-område, og modelberegnet transporttid til boringer

5. Resultater

Der er foretaget beregninger af 4 scenarier med hensyn til vandbalancer, grundvandets potentialeforhold, strømning og indvindingsoplande til vandværksboringer (Tabel 5-1). Scenarium A repræsenterer den aktuelle situation med hensyn til grundvandsindvinding og grundvandsdannelse. Scenarierne B og C repræsenterer en situation med henholdsvis en reduceret nettonedbør på 75% af den aktuelle nettonedbør, og en øget nettonedbør på 125% af den aktuelle. I scenarium D er der anvendt den tilladte indvindingsmængde for vandværkerne og til markvanding.

Scenarium	Nettonedbør	Grundvandsindvinding
A	Aktuel	Aktuel (2012)
В	75% * aktuel	Aktuel (2012)
C	125% * aktuel	Aktuel (2012)
D	Aktuel	Tilladt indvinding

Tabel 5-1 Karakteristika for de gennemførte model scenarier

5.1 Vandbalancer

For de 4 scenarier er der beregnet vandbalancer opdelt på grundvandsdannelse, vandværksindvinding, øvrig grundvandsindvinding, dræn- og vandløbsafstrømning, samt indstrømning over modelrand og udstrømning over modelrand (Tabel 5-2).

Tabel 5-2 Vandbalance for scenarierne defineret i Tabel 4-1. Indstrømning til modellen er positive værdier og udstrømning fra modellen er negativer værdier. Alle værdier er i mm/år.

Sce- nari- um	Grund- vands- dannelse	Vand- værks- indvin- ding	Øvrig grund- vands- indvinding	Vandløbs- afstrøm- ning (netto*)	Dræn- afstrøm- ning	Indstrøm- strøm- ning model- rand	Udstrøm- strøm- ning model- rand	Fejl
А	390,0	-3,9	-15,1	-45,9	-342,8	37,3	-19,7	-0,1
В	292,5	-3,9	-15,1	-39,0	-256,0	37,6	-16,1	0,0
С	487,5	-3,9	-15,1	-49,8	-431,6	35,4	-22,4	0,1
D	390,0	-4,3	-25,8	-45,2	-333,1	37,8	-19,3	0,1

* Indstrømning fra vandløb til grundvandsmagasiner udgør 1-2% af den samlede vandudveksling mellem vandløb og grundvandsmagasiner

Da den østlige afgrænsning af modelområdet udgøres af en fastholdt trykrand, ses indstrømning over modelranden at udgøre en betydelig del af den samlede vandbalance, ca. 9%. Vandværksindvindingen udgør mindre end 1% af den samlede vandbalance. Til trods for den store markvandingsindvinding i området udgør den samlede grundvandsindvinding kun 4,4% af den samlede vandbalance, for scenarium D dog 7%.

5.2 Resultater fra scenarium A

5.2.1 Hydraulisk trykniveau

Det modelsimulerede trykniveau for grundvandet er illustreret ved fire potentialekort fra fire modellag. Modellag 1 viser trykniveauet i det øverste lag med frit vandspejl (Figur 5-1). Potentialekort fra modellag 8, kote -10 m (Figur 5-2), og modellag 16, kote -50 m (Figur 5-4), viser trykniveau variationerne indenfor de dybder, hvor hovedparten af grundvandsind-vindingen finder sted. En enkelt vandværksboring indvinder grundvand væsentlig dybere omkring kote -160 m, modellag 31 (Figur 5-5).



Figur 5-1 Trykniveau modellag 1, Scenarium A

De højeste trykniveauer ses mod nordøst i modelområdet, centralt i området mellem Løgumkloster og Abild, samt i den vestlige del af området omkring Hjerpsted. Generelt afspejler trykniveauet terrænet med bakkeøerne (Figur 2-1) og en grundvandsstrømning fra øst mod vest svarende til det observerede trykniveaubillede (Figur 2-3).

Trykniveaubillederne fra modellagene 1, 8 og 16 viser ikke store indbyrdes forskelle, hvilket afspejler, at der er tale om et mere eller mindre sammenhængende magasin. I modsætning hertil ses et mere udglattet kurvebillede for trykniveauet i kote -160 m (modellag 31), som afspejler en reduceret hydraulisk forbindelse til denne dybde.


Figur 5-2 Trykniveau modellag 8, kote -10 m, Scenarium A

Vestsydvest for Løgumkloster ses et markant højdepunkt i potentialebilledet på Figur 5-1 og Figur 5-2. Sammenholdes dette med den geologiske model ses, at dette højdepunkt i landskabet primært udgøres af lavpermeable lerede jordarter, de brune farvenuancer på Figur 5-3, som betyder at det dannede grundvand kun langsomt strømmer værk fra området, hvorved der opbygges et højdepunkt i potentialebilledet.



Figur 5-3 Geologisk vest-øst profil (venstre Figur, modelrække 91) og syd-nord profil (højre Figur, modelkolonne 187) gennen højdepunktet i potentialebilledet vestsydvest for Løgumkloster, Figur 5-1 og Figur 5-2. Farvekoden for de geologiske enheder fremgår af Tabel 3-2. Profillængde: 3500 m, profildybde 125 m



Figur 5-4 Trykniveau modellag 16, kote -50 m, Scenarium A



Figur 5-5 Trykniveau modellag 31, kote -160 m, Scenarium A

5.2.2 Indvindingsoplande

Indvindingsoplandene til områdets vandværker, som i det følgende er repræsenteret ved de beregnede stationære partikelbaner, ligger generelt tæt på indvindingsboringerne (Figur 5-6). For vandværkerne Abild og Højer dækker indvindingsoplandene dog et større område længere væk fra boringerne. Indvindingsoplandet til Rens Vandværks boring viser enkelte partikelbaner som strækker sig til grundvandsmodellens rand mod øst. Dette er givetvis en effekt af, at randbetingelsen for modellen mod øst er et fastholdt trykniveau, se illustration Bilag 1, side 34-35. Som det fremgår af Tabel 5-2, sker der er relativ stor indstrømning over den østlige rand for dette scenarium, hvilket må forventes at påvirke strømningsveje og indvindingsoplande i den østlige del af området. Til sammenligning af indvindingsoplandenes størrelse og udbredelse for de 4 scenarier er der anvendt opstrøms partikelbanesimuleringer (Bilag 1).



Figur 5-6 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til vandværkernes indvindingsboringer, scenarium A

5.2.3 Grundvandsdannelse

Grundvandsdannelsen til modellag 8, kote -10 m, finder primært sted under områdets højtliggende arealer og udstrømningsområder ses primært langs vandløbene (Figur 5-7, Figur 2-1). Dybere i modellag 16, kote -50m, er de grundvandsdannende områder mindre og grundvandsdannelsen er mindre (Figur 5-8). For grundvandsdannelsen til dette dybde lag ses tydeligt en sammenhæng med den geologiske model (Figur 5-9), som viser udbredt forekomst af miocæn ler mod nordøst og i sydlige dele af modelområdet. I disse områder finder der ingen grundvandsdannelse sted. Nordøst for Løgumkloster forløber Løgumkloster 3-dalen i SØ-NV retning (Figur 5-9, Jørgensen et al., 2014), som ses af have en markant lokal effekt på størrelsen af grundvandsdannelsen og grundvandsudstrømningen.



Figur 5-7 Grundvandsdannelse til modellag 8, kote -10 m, Scenarium A



Figur 5-8 Grundvandsdannelse til modellag 16, kote -50 m, Scenarium A



Figur 5-9 Horisontalt snit af den geologiske model, venstre Figur kote -10 m (modellag 8) og højre Figur kote -50 m (modellag 16). Farvekoden for de geologiske enheder fremgår af Tabel 3-2

5.3 Resultater fra scenarium B (-25% grundvandsdannelse)

I scenarium B er grundvandsdannelsen <u>reduceret</u> med 25 % i forhold til den aktuelle grundvandsdannelse (scenarium A). Da der i grundvandsmodellen er defineret fastholdt trykniveau langs størstedelen af den østlige modelrand er resultaterne i dette scenarium ikke helt så troværdige for denne del af modelområdet.

5.3.1 Hydraulisk trykniveau

En reduceret grundvandsdannelse giver generelt et lavere trykniveau i området. Figur 5-10 viser forskelle i hydraulisk trykniveau mellem scenarium B og scenarium A (aktuel grundvandsdannelse) og for henholdsvis modellag 1 (øverste modellag), lag 8 (kote -10 m), lag 16 (kote -50 m) og lag 31 (kote -160 m). Negative værdier viser et lavere trykniveau for scenarium B, hvilket er det generelle billede for alle de viste modellag. De største fald i trykniveau ses i områder med de højeste trykniveauer omkring bakkeøerne mod vest og centralt i modelområdet samt mod nord omkring Løgum Bjerge.

Forskellen i trykniveau mellem scenarium B og A ses at være aftagende med dybden, Figur 5-10. For de viste øvre tre modellag (ned til kote -50 m) findes relativt store forskelle til scenarium A, mens forskellen i trykniveau i kote -160 m for de 2 scenarier er relativt lille. I denne dybde er trykniveauforskellen dels mindre og dels mere udglattet og mindre styret af vandløbsafstrømningen, som dog stadig genfindes i trykniveaubilledet.



Figur 5-10 Forskel i hydraulisk trykniveau mellem scenarium B (grundvandsdannelse reduceret 25%), og scenarium A (aktuel grundvandsdannelse): a. øverste modellag, b. lag 8, c. lag 16 og d. lag 31. Negative værdier viser et lavere trykniveau for scenarium B i forhold til scenarium A

5.3.2 Indvindingsoplande

For indvindingsoplande til vandværkernes boringer beregnet i scenarium B ses indvindingsoplandet til den dybe boring i Abild at få et større og mere sammenhængende indvindingsopland. For Løgumkloster ses indvindingsoplandet nu at få en sydlig gren, hvor indvindingsoplandet i scenarium A lå omkring og nord for indvindingsboringerne. For både Løgumkloster og Rens vandværker ses partikelbaner, som strækker sig til modelranden mod øst, givetvis en model artefakt (Figur 5-11).

Den reducerede grundvandsdannelse i scenarium B medfører større indvindingsoplande i forhold til scenarium A (Figur 5-12). Det generelle billede er, at indvindingsoplandene strækker sig længere væk fra indvindingsboringerne i scenarium B i forhold til scenarium A i opstrøms retning, men også at de er "bredere". Forskellene i indvindingsoplandenes udbredelse de forskellige scenarier imellem er illustreret samlet i afsnit 5.5.



Figur 5-11 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til vandværkernes indvindingsboringer, scenarium B



Figur 5-12 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til vandværkernes indvindingsboringer, scenarium B (venstre Figur) og scenarium A (højre Figur)

5.4 Resultater fra scenarium C (+25% grundvandsdannelse)

I scenarium C er grundvandsdannelsen <u>øget</u> med 25 % i forhold til den aktuelle grundvandsdannelse (scenarium A). Som for scenarium B gælder, at da der i grundvandsmodellen er defineret fastholdt trykniveau langs størstedelen af den østlige modelrand er resultaterne i dette scenarium ikke helt så troværdige for denne del af modelområdet.

5.4.1 Hydraulisk trykniveau

En øget grundvandsdannelse giver generelt et højere trykniveau i området. Figurerne 5-13 viser forskelle i hydraulisk trykniveau mellem scenarium C og scenarium A (aktuel grundvandsdannelse) for henholdsvis modellag 1 (øverste modellag), lag 8 (kote -10 m), lag 16 (kote -50 m) og lag 31 (kote -160 m). Positive værdier viser et højere trykniveau for scenarium C, hvilket er det generelle billede for alle de viste modellag. De største stigninger i trykniveau ses i områder med de højeste trykniveauer omkring bakkeøerne mod vest og centralt i modelområdet samt mod nord omkring Løgum Bjerge.

Forskellen i trykniveau mellem scenarium C og A ses at være aftagende med dybden, Figur 5-13. For de viste øvre modellag ned til kote -50 m se mindre og sammenlignelige forskelle mellem de to scenarier, hvor imod trykniveauforskellen i kote -160 m er markant anderledes. I denne dybde er trykniveauforskellen dels mindre og dels mere udglattet og mindre styret af vandløbsafstrømningen, som dog stadig genfindes i trykniveaubilledet.



Figur 5-13 Forskel i hydraulisk trykniveau mellem scenarium C (grundvandsdannelse øget 25%) og scenarium A (aktuel grundvandsdannelse): a. øverste modellag, b. lag 8, c. lag 16 og d. lag 31. Positive værdier viser et øget trykniveau for scenarium C i forhold til scenarium A

5.4.2 Indvindingsoplande

Indvindingsoplande til vandværkernes boringer beregnet i scenarium C ses at blive mindre for scenarium C sammenlignet med scenarium A (Figur 5-14 og Figur 5-15). Dette er mest markant for den dybe indvindingsboring i Abild, og for de relativt store indvindinger fra Tønder Vandværks indvindingsboringer.



Figur 5-14 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til vandværkernes indvindingsboringer, scenarium C



Figur 5-15 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til vandværkernes indvindingsboringer, scenarium C (venstre Figur) og scenarium A (højre Figur)

5.5 Resultater fra scenarium D (tilladt indvindingsmængde)

Scenarium D omfatter beregninger med den aktuelle grundvandsdannelse og den tilladte indvindingsmængde fra vandværkerne i modelområdet. Af Tabel 3-1 fremgår den aktuelle indvinding i 2012 og den tilladte indvindingsmængde for områdets vandværker. Hovedparten af vandværkerne udnytter ikke deres indvindingstilladelse fuldt ud, men kunne inden for den eksisterende tilladelse øge deres indvinding. Hvis den tilladte grundvandsmængde blev indvundet fra alle vandværksboringer i modelområdet ville det betyde en stigning på ca. 15% i forhold til den nuværende indvinding. Den største procentvise stigning, hvis indvindingstilladelserne blev udnyttet fuldt ud, ville være på Højer Vandværk, og den største absolutte stigning ville finde sted på Tønder Vandværk. Ti vandværker kunne øge indvindingen med 10% eller mere ud fra eksisterende indvindingstilladelser.

5.5.1 Hydraulisk trykniveau

Figur 5-16 til 5-19 viser trykniveaubilleder for henholdsvis modellag 1, 8, 16 og 31 for scenarium D. Trykniveauer er meget lig trykniveauerne fra scenarium A (Figur 5-1 og 5-2 samt Figur 5-4 og 5-5).



Figur 5-16 Trykniveau modellag 1, Scenarium D



Figur 5-17 Trykniveau modellag 8, kote -10 m, Scenarium D



Figur 5-18 Trykniveau modellag 16, kote -50 m, Scenarium D



Figur 5-19 Trykniveau modellag 31, kote -160 m, Scenarium D

Sammenlignes forskelle i trykniveauer mellem scenarium D og scenarium A (aktuel indvinding) ses, at det primært er omkring Tønder Vandværk, men også i mindre omfang ved Ballum, Bredebro, Sønder Sejerslev og Daler vandværker, at der ses en forøget sænkning af trykniveauet. Den øgede afsænkning er dog relativt beskeden, under 0,5 m (Figur 5-20 a. b. c.). For de øvrige områder udenfor vandværkernes indvindingsområder, hvor der på Figur 5-20 a. b. c. d. ses en forøget afsænkning, tilskrives denne indvindingsanlæg til markvanding, som i dag ikke udnytter den givne indvindingstilladelse fuldt ud.

Centralt i den nordlige del af modelområdet ses et blåt område, som viser at sænkningen her ved den nuværende indvinding er større end den vil være ved en fuld udnyttelse af den eksisterende indvindingstilladelse. Et opslag i Jupiter databasen viser at der for et år i periode 1991-2010 er oplyst en aktuel indvinding på over 2 mio. m³ mod en normal årlig indvinding på 10.000 til 50.000 m³ for en markvandingsboring på dette sted. I modelopsætningen benyttes den gennemsnitlige indvinding for perioden 1991-2010, hvilket giver en aktuel indvinding på 165.000 m³/år. Til det pågældende markvandingsanlæg er der en tilladelse på 55.000 m³/år.



Figur 5-20 Forskel i trykniveau mellem scenarium D (tilladt indvinding) og scenarium A, (aktuel indvinding): a. øverste modellag, b. lag 8, c. lag 16 og d. lag 31. Negative værdier viser et reduceret trykniveau for scenarium D i forhold til scenarium A

5.5.2 Indvindingsoplande

Som følge af den større indvinding ved scenarium D er indvindingsoplandene til vandværkernes boringer ved dette scenarium større sammenlignet med oplandene beregnet i scenarium A (Figur 5-21 og 5-22).



Figur 5-21 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til vandværkernes indvindingsboringer, scenarium D



Figur 5-22 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til vandværkernes indvindingsboringer, scenarium D (venstre Figur) og scenarium A (højre Figur)

Ved at vise de beregnede indvindingsoplande for de 4 scenarier sammen ses, at de mindste indvindingsoplande beregnes i scenarium C (øget grundvandsdannelse). Indvindingsoplandene bliver gradvist større i scenarium A (aktuel indvinding) og scenarium D (tilladt indvinding). De største indvindingsoplande ses i scenarium B (reduceret grundvandsdannelse) (Figur 5-23 til 5-26).



Figur 5-23 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til alle vandværksboringer, scenarium A, B, C og D



Figur 5-24 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til boringer til Tønder og Abild vandværker, scenarium A, B, C og D



Figur 5-25 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til vandværksboringer i områdets nordvestlige del, scenarium A, B, C og D



Figur 5-26 Partikelbaneberegnede ndvindingsoplande til vandværksboringer i områdets sydøstlige del, scenarium A, B, C og D

For scenarium D, som er det scenarium som Naturstyrelsen har valgt at lægge til grund for områdeudpegningen i dette kortlægningsområde, er der foretaget mere omfattende partikelbaneberegninger af indvindingsoplande til de enkelte indvindingsboringer og kildepladser.

Med udgangspunkt i de opstrøms partikelbaneberegninger af indvindingsoplande er der også foretaget en nedstrøms beregning af indvindingsoplande. Metoderne er beskrevet nærmere i Bilag 1, hvor der for alle indvindingsboringer og kildepladser er vist indvindingsoplande beregnet ved såvel nedstrøms som opstrøms partikelbaneberegninger. De to metoder giver lidt forskellige resultater og giver dermed et visuelt indtryk af usikkerheden på bestemmelsen af indvindingsoplandene.

I Bilag 1 er vist eksempler på, hvordan den detaljerede geologiske models fordeling af højog lavpermeable voxler har betydning for partikelbanernes forløb fra grundvandsdannelse til boring. Dette ses for eksempel ved Tønder Vandværks sydligste boring (166.462), hvor der er tydelig sammenhæng mellem indvindingsoplandets krogede forløb og udbredelsen af lerede enheder i grundvandsmagasinet nord for boringen.

Figur 5-27 til 5-30 viser indvindingsoplandene beregnet ved nedstrøms partikelbaneberegninger. Sammenlignet med de opstrøms beregninger (se tidligere figurer i dette kapitel) giver de nedstrøms beregning lidt mere sammenhængende indvindingsoplande og der ses ikke på samme måde 'vildfarende' partikler. At der ved de nedstrøms partikelbaneberegninger ikke ses partikelbaner, som går fra modellens rand og ind i oplandet (fx Figur 5-23) skyldes, at der ikke er partikler der har startpunkt ved modelranden.



Figur 5-27 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande, scenarium D



Figur 5-28 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til boringer til Tønder og Abild vandværker, scenarium D



Figur 5-29 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til vandværksboringer i områdets nordvestlige del, scenarium D



Figur 5-30 Partikelbaneberegnede indvindingsoplande til vandværksboringer i områdets sydøstlige del, scenarium D

5.5.3 Grundvandsdannende oplande og transporttider

For hovedparten af indvindingsboringerne sker grundvandsdannelsen i umiddelbar nærhed af boringerne (Figur 5-31 til 5-34). Kildepladserne er således placeret i de grundvandsdannende områder. En undtagelse herfra er den dybe indvindingsboring i Abild, hvor de grundvandsdannende områder ligger spredt i afstande på 0,8 til 3 km fra indvindingsboringen. For indvindingsboringerne til Højer Vandværk ses, at en del af det grundvandsdannende opland er beliggende omkring 3 km nord for boringerne, hvor grundvandspotentialet er højest.

Også for Sønder Sejerslev og Løgumkloster vandværker samt for Tønder Vandværks sydlige boring (166.462) ses 'huller' eller usammenhængende grundvandsdannende oplande. Dette er nærmere illustreret i Bilag 1.

Grundvandets transporttid til den enkelte indvindingsboringer er generelt på under 200 år, det vil sige størstedelen af indvindingsoplandene udgøres af 200 års zonen (Figur 5-31 til 5-34).

De væsentligste afvigelser herfra ses ved Abild, Højer og Rens vandværker. Ved Abild Vandværk har ingen af partiklerne en transporttid på under 270 år fra grundvandsdannelse til boring, og 10% af partiklerne har en transporttid på over 4.500 år. Ved Højer Vandværk har partiklerne i det grundvandsdannende opland omkring boringen en transporttid på under 40 år, i det adskilte grundvandsdannende opland nord for indvindingsboringerne har alle partikler en transporttid på mellem 6.400 og 22.000 år. Også for Rens Vandværk er det grundvandsdannende opland delt i to separate områder. I området nærmest indvindingsboringen er partiklernes transporttid op til 50 år. I området længere væk fra boringen er partiklernes transporttid på over 400 år (Bilag 2).

For en række af de øvrige vandværker ses også transporttider på over 200 år (Figur 5-31 til 5-34). Fælles for disse er, at det er få procent af partiklerne, som har en transporttid på over 200 år. I Bilag 2 ses grundvandets aldersfordeling beregnet ud fra partikelbaneberegninger for alle kildepladser.



Figur 5-31 Partikelbaneberegnede grundvandsdannende oplande og transporttider, Scenarium D



Figur 5-32 Partikelbaneberegnede grundvandsdannende oplande og transporttider (zoom), Scenarium D



Figur 5-33 Partikelbaneberegnede grundvandsdannende oplande og transporttider (zoom), Scenarium D



Figur 5-34 Partikelbaneberegnede grundvandsdannende oplande og transporttider (zoom), Scenarium D

5.5.4 Grundvandsdannelse

Det er forventeligt at en øget grundvandsindvinding vil påvirke grundvandsdannelsen med en større infiltration til følge. Dette kan dog ikke ses på den anvendte skala i figurerne, Figur 5-7 og 5-8 sammenlignet med Figur 5-35 og 5-36. Det spiller her også ind, at den øgede grundvandsindvinding er meget lille i forhold til den samlede vandbalance for området.



Figur 5-35 Grundvandsdannelse til modellag 8, kote -10 m, Scenarium D



Figur 5-36 Grundvandsdannelse til modellag 16, kote -50 m, Scenarium D

Figur 5-37 og 5-38 viser grundvandets hastighedsvektorer i henholdsvis kote -10 m og -50 m. I det øvre lag ses, hvordan grundvandet dannes i de højtliggende områder (Figur 2-1) og strømmer ned mod vandløb, marskområdet eller mod havet i vest. I det dybere lag ses større områder med opadgående grundvandsstrømning mod de større vandløbssystemer nordøst og sydøst i området.



Figur 5-37 Hastighedsvektorer modellag 8, kote -10 m, Scenarium D



Figur 5-38 Hastighedsvektorer modellag 16, kote -50 m, Scenarium D

6. Diskussion og konklusion

Grundvandsmodellen for Tønder – Løgumkloster området dækker et større område på ca. 625 km². Områdets geologi er meget kompleks og der er opstillet en detaljeret voxel-model med 4 mio. celler og 40 lithologier (Jørgensen et al. 2014). Denne voxel-model er importeret til grundvandsmodellen, hvor der er sket en reduktion af antallet af celler dels på grund af afgrænsningen til saltvandet mod sydvest i området, som ikke er inkluderet i modellen, og dels da bunden af grundvandsmodellen er valgt at være top af paleogen. Det betyder at den geologiske model i grundvandsmodellen består af 2,9 mio. celler.

For at lette kalibreringsprocessen blev de 40 lithologiske enheder grupperet i 8 hydrofacies i forhold til alder (kvartær, prækvartær), bjergart (sand/ler) og hydraulisk ledningsevne (høj/lav). Kun for de sandede enheder var det muligt at foretag en automatisk parameter estimering. For de lerede enheder blev de hydrauliske enheder bestemt ved manuel kalibrering. Ved kalibreringen er der opnået en middelfejl og en kvadratafvigelsessum på henholdsvis ME = 0,18 m og RMS = 1,77 m, hvilket vurderes at være tilfredsstillende.

En sammenligning mellem grundvandsaldre bestemt ved CFC-metoden for filtre i grundvandsovervågningsområdet Abild og partikelbanesimuleringer viser CFC-aldre på 25 - 50år for filtre 17 - 28 m under terræn, mens modellens partikelbanealdre er på 9 - 23 år for de samme filtre. Både målte C-14 aldre (ukorrigerede) og modelberegnede aldre for grundvandet i Abild boringen viser, at dette er flere hundrede år gammelt. Valideringen af modellen anses derfor som acceptabel.

Vandværksindvindingen udgør mindre end 1% af den samlede vandbalance, og trods en stor markvandingsindvinding udgør den samlede grundvandsindvinding under 4,5% af den samlede vandbalance. Den østlige afgrænsning af modelområdet er defineret ved en fastholdt trykrand, og indstrømningen over modelranden udgør en betydelig del af den samlede vandbalance, ca. 9%. Det skal bemærkes, at størrelsen af denne indstrømning er behæftet med relativ høj usikkerhed, bl.a. fordi der ikke er målinger af fluksen til rådighed, som kan understøtte resultatet.

Da vandværkernes indvindingsboringer for langt de flestes vedkommende befinder sig i grundvandsdannende områder, er de grundvanddannende oplande og indvindingsoplande beliggende omkring og umiddelbart opstrøms boringerne. Undtagelserne herfra er Abild, Højer og Rens vandværker. Abild vandværk adskiller sig fra de øvrige vandværker ved at have en indvindingsboring i 170 m dybde, hvor indvindingsboringerne til de øvrige vandværker generelt ligger 15 – 50 m under terræn. Transporttiderne for grundvandet til indvindingsboringerne er generelt under 200 år.

For de to scenarier med henholdsvis en 25% reduceret grundvandsdannelse (scenarium B) og en 25% forøget grundvandsdannelse (scenarium C) ses de største ændringer af trykniveauet i områder med de højeste trykniveauer omkring bakkeøerne mod vest og centralt i modelområdet samt mod nord omkring Løgum Bjerge. Ved scenarium B ses fald i trykniveauet på op til 1 m, og ved scenarium C ses stigninger i trykniveauet på op til 1 m.

Scenarium D omfatter beregninger med den tilladte indvindingsmængde fra vandværker og markvandingsanlæg i modelområdet. Hvis den tilladte grundvandsmængde blev indvundet fra alle vandværksboringer i modelområdet ville det betyde en stigning på ca. 10% i forhold til den nuværende indvinding. Indvindingsoplandene til vandværkernes indvindingsboringer er for de fleste vandværkers vedkommende større for scenarium D sammenlignet med scenarium A som følge af den større indvinding.

7. Referencer

- Anderman, E.R., M.C. Hill (2000), Documentation of the hydrogeologic-unit flow (HUF) package. US Geological Survey Open File Rep 00-342.
- Doherty, J. (2005), PEST. Model-Independent Parameter Estimation. User Manual: 5th Edition. 5th Edition published in 2005.
- Grontmij Carl Bro (2010), Grundvandsmodel for Grindsted By. Region Syddanmark.
- Henriksen, H.J., L. Troldborg (2011), 3D hydrologisk strømningsmodel for Egebjerg området. Kvantificering af grundvandsressourcen og afgrænsning af indvindings-oplande ved nuværende og fremtidigt klima. GEUS Rapport 2011/101.
- Jørgensen, F., P. Sandersen, A.-S. Høyer, R. R. Møller, T. M. Pallesen, X. He, M. Kristensen, T. Sonnenborg & F. von Platen-Hallermund (2014), 3D geologisk model ved Tønder. GEUS Rapport 2014/39.
- Orbicon Leif Hansen A/S (2010), Boringsregistrering og pejling i kortlægningsområde Tønder - Løgumkloster m.fl. Rapport udarbejdet for Miljøcenter Ribe. Viby J, juni 2010.
- Orbicon (2013), GKO Arrild m.fl. Supplerende dataindsamling. Boringsregistrering, vandprøvetagning, Boring DGU nr. xxxxx, prøvepumpning. Foreløbig rapport udarbejdet for Miljøcenter Ribe. Viby J, 9. februar 2013.
- Ovesen, N.B., H.L. Iversen, S.E. Larsen, D.-I. Müller-Wohlfeil, L.M. Svendsen, A.S. Blicher and P.M. Jensen (2000), Afstrømningsforhold i danske vandløb, Faglig rapport fra DMU, Nr. 340, 2000.
- Rambøll (2012), Boringsregistrering og synkronpejling. GKO Sommersted. Rapport udarbejdet for Naturstyrelsen Ribe. Aarhus, juni 2012.
- Rasmussen, J., T. O. Sonnenborg, S. Stisen, L. P. Seaby, B. S. B. Christensen, K. Hinsby (2012), Climate change effects on irrigation demands and minimum stream discharge: impact of bias-correction method. Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 4675–4691, 2012. doi:10.5194/hess-16-4675-2012.
- Rasmussen, P. & P. Jensen (2015a), Supplerende boringsregistrering og synkronpejling i kortlægningsområdet Tønder - Løgumkloster. GEUS Rapport 2015/11.
- Rasmussen, P. (2015b), Prøvepumpninger i kortlægningsområdet Tønder Løgumkloster. GEUS Rapport 2015/10.
- Refsgaard, J.C., L.Troldborg, H.J. Henriksen, A.L. Højberg, R.R. Møller, A.M. Nielsen (2010), God praksis i hydrologisk modellering, Geo-vejledning nr. 7, GEUS.
- Sandersen, P., T.S. Kirkeby, C. Vejergang, N.P. Arildskov, P, Nordahn, T, Pallesen, E. Rasmussen, U.T. Jacobsen, (2010), Trin-1 kortlægning af Tønder, Løgumkloster og Løgumgårde, Højer og Daler samt Rørkær-Jejsing kortlægningsområder. Grontmij. April 2010.
- Scharling, P. (2011), Hydrogeological modeling and multiple environmental tracer analysis of the deep Miocene aquifers within the Skjern and Varde river catchment, PhD thesis, KU, pp. 140.
- Seifert, D., T.O. Sonnenborg, P. Scharling, K. Hinsby (2008), Use of alternative conceptual models to assess the impact of a buried valley on groundwater vulnerability. Hydrogeology Journal (2008) 16: 659–674. DOI 10.1007/s10040-007-0252-3.

- Sonnenborg, T. O., H.J. Henriksen (eds.) (2005), Håndbog i grundvandsmodellering, GEUS Rapport 2005/80.
- Sonnenborg, T.O., X. He (2012), Groundwater model for the Ølgod-Skovlund Mapping area. GEUS. August 2012.
- Stisen, S., T.O. Sonnenborg, A.L. Højberg, L. Troldborg, J.C. Refsgaard (2011), Evaluation of climate input biases and water balance issues using a coupled surface-subsurface model, Vadose Zone Journal, 10, 37-53.
- He, X., T.O. Sonnenborg, F. Jorgensen, A.-S. Høyer, R. R. Møller, and K. H. Jensen (2013), Analyzing the effects of geological and parameter uncertainty on prediction of groundwater head and travel time. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 3245-3260, 2013. doi:10.5194/hess-17-3245-2013.

Bilag 1. Beregning af indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider ved hjælp af partikelbane simuleringer, scenarium D

Indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider til vandværkernes indvindingsboringer er bestemt ved partikelbanesimuleringer. Der er anvendt programmet MODPATH, som beregner partikelbaner ud fra hastighedsvektorer bestemt af **strømnings**modellen MODFLOW. Brugerfladen Groundwater Vistas version 6.7 er anvendt til modelopsætning, modelkørsler og udtrækning af resultater.

Der er anvendt såvel opstrøms (reverse) som nedstrøms (forward) partikelbane simuleringer til bestemmelse af oplande og transporttider. Der er to grunde til at der er gennemført såvel opstrøms som nedstrøms partikelbanesimuleringer til områdets vandværksboringer. For det første giver den opstrøms partikelbanesimulering et godt grundlag for den geografiske placering af partikler til nedstrøms beregninger (Figur 1). For det andet giver det at have udført 2 (næsten) uafhængige partikelbanesimuleringer et indtryk af usikkerheden på partikelbanesimuleringerne.

Ved beregning af indvindingsoplande ved opstrøms partikelbaneberegning placeres et antal partikler i en eller flere koncentriske cirkler rundt om boringen i det/de modellag hvorfra der foretages en grundvandsindvinding. Ved modelberegningerne vil partiklerne bevæge sig opstrøms mod det modellag hvor grundvandsdannelsen til den pågældende boring finder sted, normalt lag 1. De beregnede partikelbaner viser indvindingsoplandet til den pågældende boring, og partiklernes slutposition viser det grundvandsdannende opland. Ved den opstrøms partikelbaneberegning fås desuden transporttiden for partiklerne langs de beregnede partikelbaner. Transporttiden beregnes fra boringen og opstrøms i oplandet til det grundvandsdannende område.

Ved nedstrøms (forward) partikelbaneberegninger placeres et antal partikler i det modellag hvor grundvandsdannelsen finder sted (lag 1). For de partikler som ender i indvindingsboringen, vil deres startposition vise det grundvandsdannende opland og deres partikelbaner fra lag 1 og til indvindingsboringen vil vise indvindingsoplandet. Ved nedstrøms partikelbaneberegninger fås transporttiden fra det grundvandsdannende område og frem til boringen, det vil sige transporttiden vises 'modsat' af transporttiden beregnet ved opstrøms beregninger.

Den ved opstrøms partikelbaner beregnede totale transporttid fra boring til grundvandsdannende område er sammenlignelig med den tilsvarende samlede transporttid beregnet ved nedstrøms partikelbanesimuleringer.

I nærværende rapport er der benyttet følgende fremgangsmåde ved bestemmelse af indvindingsoplande, grundvandsdannende oplande og transporttider.

- 1) Indvindingsoplande og transporttider bestemmes først ved opstrøms (reverse) partikelbane beregninger
- På grundlag af indvindingsoplande bestemt ved opstrøms partikelbaneberegninger afgrænset et lidt større område indenfor hvilket der placeres et antal partikler i hver grid celle i modellag 1 (Figur 1)
- 3) Med de i 2) placerede partikler foretages en nedstrøms partikelbaneberegning
- 4) Der foretages en (manuel) selektering af de partikler i 3) som ender i de relevante indvindingsboringer
- 5) De udvalgte partiklers startplacering og transportveje viser indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande, inklusiv den samlede transporttid fra grundvandsdannende oplande til boring.



Figur 1 Opstrøms partikelbanesimuleringer (venstre figur) bruges til placering af partikler til i nedstrøms partikelbanesimuleringer (højre figur).

Indvindingsoplande og transporttiden til de enkelte indvindingsboringer til vandværkerne er bestemt ved opstrøms partikelbaneberegninger, hvor der er placeret partikler i to koncentriske cirkler med en radius på henholdsvis 25 m og 100 m omkring den enkelte indvindingsboring og dybdemæssigt midt i det filtersatte lag. For boringer som er filtersat over flere modellag er der frigivet partikler fra koncentriske cirkler i alle filter modellag, 100 partikler pr cirkel. For Højer Vandværks boringer, som er beliggende i et udstrømningsområde, er der anvendt radier på 25 m og 50 m. For vandværker med to eller flere boringer på kildepladsen er der foretaget en individuel vurdering af, hvor mange partikelcirkler på 25 m og 100 m der er benyttet afhængigt af afstanden mellem de enkelte indvindingsboringer.

Indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande er bestemt ved nedstrøms partikelbanesimuleringer. Her er der placeret 16 partikler i hver udvalgt grid celle i modellens øverste aktive lag. For partikler, som ender i indvindingsboringen, udgør partiklernes startpunkt det grundvandsdannende opland. Partiklernes strømningsbaner fra det grundvandsdannende område til boringens filter udgør indvindingsoplandet til den enkelte boring. I Groundwater Vistas eksporteres alle partikelplaceringer langs hver partikelbane til visning af indvindingsoplande. Til visning af grundvandsdannende oplande eksporteres kun den enkelte partikels start- og slutpunkt.

I det følgende er der for hvert vandværk vist 3 figurer af henholdsvis indvindingsopland beregnet ved reverse partikelbaneberegning, indvindingsopland beregnet ved forward partikelberegning og grundvandsdannende opland beregnet ved forward partikelbaneberegning for scenarium D. Ved det grundvandsdannende opland er desuden vist transporttider.

For enkelte vandværker er der vist reverse partikelbanesimuleringer med 4 forskellige radier på henholdsvis 25m, 50m, 75m og 100m for at illustrerer betydningen af at benytte forskellige radier ved opstrøms partikelbaneberegninger.

For enkelte vandværker er der vist partikelbaner i geologiske plan og profilsnit til illustration af særlige forhold omkring partikelbanebevægelser. Endelig er der for et enkelt vandværk, Sønder Sejerslev, vist betydningen af sæsonbestemt indvinding for udbredelse af indvindingsoplandet. Farvekoder og hydrauliske ledningsevner for de enkelte geologiske enheder fremgår af rapportens afsnit 3.4 og 4.2.

I figurteksterne i det følgende refererer a), b) og c) til denne placering af de enkelte figurer:

a)	Legende			
b)	c)			

Tabel 1Vandværker med tilknyttede indvindingsboringer, partikelradier anvendt ved opstrøms partikel-
baneberegninger, test-radier og boringer som nedenfor er vist i kombination af partikelbaner og geologiske
profiler

#	Vandværk	DGU nr.	Partik. radius r1 (m)	Partik. radius r2 (m)	Test radi- us r1 (m)	Test radi- us r2 (m)	tryk niveau kort	Partik. baner og geologi
1	Abild Vandværk	166. 711	25	100	50	75		
2	Ballum Vandværk	158. 614	25	100				
	Ballum Vandværk	158. 834						
3	Borg Vandværk	158. 621	25	100	50			
	Borg Vandværk	158. 622						
4	Daler Vandværk	166. 603	25	100	50	75		
	Daler Vandværk	166. 728						
5	Højer vandværk	166. 512	25	50			v	v
	Højer vandværk	166. 548	25	50			×	X
6	Løgumgårde Vandværk	159. 1187	25	100				х
7	Løgumkloster Vandværk	159. 370						v
	Løgumkloster Vandværk	159. 478	25	100				
8	Rørkær - Jejsing vv, Kipkær	167. 1559	25	100				
9	Rørkær - Jejsing vv, Kærvej	167. 1562	25	100				
10	Sdr. Sejerslev Vandværk	158. 817	25	100				
	Sdr. Sejerslev Vandværk	158. 818	25					x
	Sdr. Sejerslev Vandværk	158. 937	25					
11	Tønder Vandværk	166. 435	25	100				
	Tønder Vandværk	166. 446	25	100				
	Tønder Vandværk	166. 462	25	100	50	75		х
	Tønder Vandværk	166. 467	25	100				
	Tønder Vandværk	166. 469	25	100				
	Tønder Vandværk	166. 470	25	100				
	Tønder Vandværk	166. 759	25	100				
	Tønder Vandværk	166. 763	25	100				
12	Visby Vandværk	158. 618	25	100				
	Visby Vandværk	158. 683						
13	Østerby-Gærup Vandværk	166. 511	25	100				
	Østerby-Gærup Vandværk	166. 724						
14	Rens Vandværk	167. 1443	25	100				
15	Bredebro Vandværk	158. 841	25	100				
	Bredebro Vandværk	158. 966	25					



Abild Vandværk, boring 166. 711

Figur 2 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider

Abild Vandværk, boring 166. 711 (2)



Figur 3 Sammenligning af opstrøms partikelberegninger foretaget ved frigivelse af partikler henholdsvis a) 50m, b) 75m og c) 25m og 100m fra boringscentrum





Figur 4 Illustration af hvordan partikelbanernes forløb er påvirket af beliggenheden høj og lavpermeable geologiske enheder (voxler). De 2 øverste figurer viser partikelbaner projiceret på horisontale lag i 2 dybder. De viste lags dybde fremgår at de 2 midterste profiler. De 2 nederste figurer viser partikelbaner projiceret på vest-øst profiler (venstre figur) og syd-nord profiler (højre figur), samme profiller som de midterste figurer. Profilernes beliggenhed fremgår af de 2 øverste figurer


Ballum Vandværk, boring 158.614 og 158.834

Figur 5 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider



Borg Vandværk, boring 158.621 og 158.622

Figur 6 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider

Borg Vandværk, boring 158.621 og 158.622 (2)

Borg Vandværk har områdets mindste grundvandsindvinding på 5.300 m³/år. Dette svarer til grundvandsdannelsen i 2 grid-celler. Nedenstående Figur 7 viser størst overensstemmelse mellem nedstrøms partikelbaner og de opstrøms partikelbaner som har en startplacering i en radius på 50m sammenlignet med en startradius på 100m. Dette skyldes givetvis den relativet beskedne indvinding. I Figur 7 c) ses at partikler fra den nedstrøms partikelbaneberegning starter ca. 50m nordligere end de opstrøms partikelbaner ender, hvilket er indenfor grid-celle og dermed den nøjagtighed der kan opnås



Figur 7 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, r=50m, b) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, r=100m, c) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende nedstrøms beregning, r=50m



Daler Vandværk, boring 166. 603 og 166.728

Figur 8 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider

Daler Vandværk, boring 166. 603 og 166.728 (2)



Figur 9 Sammenligning af opstrøms partikelberegninger foretaget ved frigivelse af partikler henholdsvis a) 50m, b) 75m og c) 25m og 100m fra boringscentrum



Højer vandværk, boring 166. 512 og 166.548

Figur 10 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider

Årsagen til at der ses en forskel i partikelbaneforløbene mellem de opstrøms partikelbane simuleringer vist på fx Figur 5-6 og ovenstående Figur 10 a) er, at der tale om 2 forskellige partikelbane simuleringer, hvor der er anvendt forskellige start radier for partiklerne.



Figur 11 Grundvandstrykniveau i kote -10m (modellag 8) sammenholdt med partikelberegninger af indvindingsoplande til Højer Vandværks 2 indvindingsboringer

Højer vandværk, boring 166. 512 og 166.548 (2)

Højer vandværks boringer ligger i et udstrømningsområde og er mod vest og øst til dels begrænset af mere lavpermeable geologiske enheder.



Figur 12 Partikelbaneberegninger vist sammen med voxel-geologi. Øverste 2 figurer viser partikelbaner projiceret på horisontale lag i 2 dybder. Nederste 2 figurer viser partikelbaner projiceret på syd-nord og vest-øst profiler gennem indvindingsboringerne

Mod sydvest i modelområdet og sydvest for Højer Vandværks indvindingsboringer er grænsen til det salte grundvand implementeret i grundvandsmodellen som en 'no-flow' randbetingelse, dette er vist på nedenstående figurer som sorte grid celler.



Figur 13 Opstrøms partikelbane simuleringer vist for transporttider på maksimalt henholdsvis 200 år og 20.000 år. Partikelbaner vist med farver forskellig fra sort er partikelbaner i modellag 1 til 8. Højer Vandværks indvindingsboringer er placeret i modellagene 7 og 8



Løgumgårde Vandværk, boring 159.1187

Figur 14 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider



Løgumkloster Vandværk, boring 159. 370 og 159.478

Figur 15 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider

Løgumkloster Vandværk, boring 159. 370 og 159.478, og Løgumgårde Vandværk, boring 159.1187 (2)

I indvindingsoplandet og i det grundvandsdannende område til Løgumkloster Vandværks boringer ses mod nordvest områder hvor der ingen partikelbaner er svarende til de lerede områder (16)



Figur 16 Partikelbaner for Løgumkloster Vv boringer (tv) og Løgumgårde Vv boring (th). Illustration af hvordan partikelbanernes forløb er påvirket beliggenheden høj og lavpermeable geologiske enheder (voxler). De 4 øverste figurer viser partikelbaner for henholdsvis Løgumkloster Vv. (2 øverste figurer til venstre) og Løgumgårde Vv. (2 øverste figurer til højre) projiceret på horisontale lag. Nederst partikelbaneberegning af indvindingsopland til Løgumkloster Vandværks boringer med 'huller' svarende til placeringen af lerede geologiske enheder nordvest for indvindingsboringerne og til indvindingsoplandet for Løgumgårde Vandværks boring mod nordøst for indvindingsboringerne



Rørkær - Jejsing vv, Kærvej, boring 167.1562

Figur 17 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider



Rørkær - Jejsing vv, Kipkærvej, boring 167.1559

Figur 18 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider



Sønder Sejerslev Vandværk, boring 158.817, 158.818 og 158.937

Figur 19 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider

Sønder Sejerslev Vandværk, boring 158.817, 158.818 og 158.937 (2)

Sønder Sejerslev Vandværk har 3 indvindingsboringer med en samlet indvindingstilladelse på 165.000 m3/år . Boringernes placering fremgår af nedenstående figur. Boringerne indvinder grundvand fra dybder mellem kote -8m og kote -21m. Cirka 100m nordvest for vandværkets nordligste boring er placeret en markvandingsboring, DGU nr. 158.755, som indvinder grundvand fra en dybde mellem kote -6m og kote -24m, det vil sige fra ca. samme dybde som vandværkets boringer. Der er en tilladelse til at oppumpe 59.000 m3/år grundvand fra markvandingsboringen.

Grundvandsmodellen er en stationær model, hvilket betyder at grundvandsindvindingen er konstant over tid. Markvandingsboringer er typisk kun i brug nogle få måneder om året. De nedenstående 3 figurer (Figur 20, 21 og 22) viser betydningen for størrelsen og placeringen af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande samt transporttiden afhængigt af om der pumpes fra markvandingsboringen eller ej.



Figur 20 Beregning af indvindingsopland til Sdr. Sejerslevs 3 boringer ved opstrøms partikelbanesimuleringer. a) indvindingsopland til vandværket med en konstant indvinding på 59.000 m3/år fra markvandingsboring DGU nr. 158.755, b) indvindingsopland til vandværket uden samtidig indvinding fra markvandingsboring DGU nr. 158.755, c) kombination af a) og b)



Sønder Sejerslev Vandværk, boring 158.817, 158.818 og 158.937 (3)

Figur 21 Beregning af indvindingsopland til Sdr. Sejerslevs 3 boringer ved nedstrøms partikelbanesimuleringer. a) indvindingsopland til vandværket med en konstant indvinding på 59.000 m3/år fra markvandingsboring DGU nr. 158.755, b) indvindingsopland til vandværket uden samtidig indvinding fra markvandingsboring DGU nr. 158.755, c) kombination af a) og b)



Sønder Sejerslev Vandværk, boring 158.817, 158.818 og 158.937 (4)

Figur 22 Beregning af grundvandsdannende opland og transporttider til Sdr. Sejerslevs 3 boringer ved nedstrøms partikelbanesimuleringer. a) grundvandsdannende opland og transporttider til vandværket med en konstant indvinding på 59.000 m3/år fra markvandingsboring DGU nr. 158.755, b) grundvandsdannende opland og transporttider til vandværket uden samtidig indvinding fra markvandingsboring DGU nr. 158.755, c) kombination af a) og b)



Sønder Sejerslev Vandværk, boring 158.817, 158.818 og 158.937 (5)

Figur 23 Illustration af fordelingen sandede (røde) og lerede (brune) geologiske enheder i området ved Sønder Sejerslevs indvindingsboringer. Øverste figur viser beliggenheden af de viste geologiske profiler. Herunder ses 2 syd-nord profiler gennem kildepladsen. Nederste 4 vest-øst profiler viser hvordan de geologiske forhold ændrer sig markant over korte afstande. De 2 nederste figurer viser hvordan grundvandsstrømningen er koncentreret gennem lag med overvejende sande enheder, tætheden af partikelbaner (de sorte linjer) er større mod vest sammenlignet med centralt i det grundvandsdannende opland



Sønder Sejerslev Vandværk, boring 158.817, 158.818 og 158.937 (6)

Figur 24 Øverst partikelbaner til Sønder Sejerslev Vandværks 3 indvindingsboringer. Nederst partikelbaner til markvandingsboring 158.755. På figurer til venstre er anvendt en partikelradius på 25m og på figurer til højre er anvendt en partikelbaneradius på 50m. Partikelbanerne er projiceret på et horisontalt modellag kote -15m til -20m

Tønder Vandværk, 8 indvindingsboringer



Generelt ses de nedstrøms partikelbaneberegninger at vise et større indvindingsopland i forhold til de med opstrøms partikelbaneberegnede oplande (Figur 25 a) og b))

Figur 25 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider

Tønder Vandværk, boring 166.462



Figur 26 Sammenligning af opstrøms partikelberegninger foretaget ved frigivelse af partikler henholdsvis 50m, 75m og 100m fra boringscentrum, samt de 3 beregninger vist på samme figur nederst til højre



Figur 27 Sammenligning af opstrøms partikelbaneberegninger foretaget med frigivelse af partikler i henholdsvis en cirkel med radius på 100 m (venstre figur) og i to cirkler med radius på 25 m og 100 m (højre figur)



Tønder Vandværk, boring 166.462 (2)

Figur 28 Illustration af hvordan partikelbanernes forløb er påvirket af beliggenheden høj og lavpermeable geologiske enheder (voxler). Øverste 2 figurer viser partikelbanerne projiceret på 2 horisontale lag i forskellige dybder. De 2 nederste profiler viser partikelbanerne projiceret på syd-nord profiler i forskellige afstande fra indvindingsboringen, samme profiller som de midterste figurer. Profilernes beliggenhed fremgår af de 2 øverste figurer

Tønder Vandværk, boring 166.763 (3)



Figur 29 Illustration af hvordan partikelbanernes forløb er påvirket af beliggenheden høj og lavpermeable geologiske enheder (voxler), øverst til højre partikelbaner projiceret på et horisontalt lag (venstre figur), og nederst til højre partikelbaner projiceret på et syd-nord profil (venstre figur)



Visby Vandværk, boring 158.618 og 158.683

Figur 30 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider

Indvindings opland

A
Indvidings opland

A
Indvidur vandwark

OsterbylndvOpi-D33

OsterbylndvOpi-D33

OsterbylndvOpi-D33

OsterbylndvOpi-D33

OsterbylndvOpi-D33

Indvidur vandwark

OsterbylndvOpi-D33

Indvidur vandwark

OsterbylndvOpi-D33

Indvidur vandwark

Indvindi

Indvin



Bilag 1

Figur 31 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider

Rens Vandværk, boring 167.1443

Partikelbanerne på Figur 32 a) viser at den del af indvindingsoplandet strækker sig fra indvindingsboringen og stik øst mod modelranden, dette er en effekt af modelranden, se Figur 33.

Figur 32 c) viser at grundvandsdannelsen finder sted i 2 adskilte områder væk fra selve det område hvor indvindingsboringen er placeret, en effekt af den relativt dybe placering af indvindingsboringens indtag (kote -38m til -44m), den relativt lille indvinding (ca. 18.500 m³/år) og de geologiske forhold.



Figur 32 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider

Rens Vandværk, boring 167.1443 (2)



Figur 33 Partikelbanerne på figuren nederst til venstre viser at den del af indvindingsoplandet, der strækker sig fra indvindingsboringen og stik øst mod modelranden hidrører fra modelranden, da partikelbanerne ender ved selve modelranden, øverst samme profiler som nederst men uden projicerede partikelbaner



Bredebro Vandværk, boring 158.841, 158.966

Figur 34 a) opstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland, b) nedstrøms partikelbaneberegning af indvindingsopland placeret over tilsvarende opstrøms beregning, c) grundvandsdannende opland og transporttider



Figur 35 Figuren viser partiklernes endepunkt og transporttid for den opstrøms partikelbanesimulering svarende til 34 a). Udstrækningen af det grundvandsdannende opland er ikke godt bestemt ved denne metode sammenlignet med 34 c)

Bredebro Vandværk, boring 158.841, 158.966 (2)

I 2012 fik Bredebro vandværk etableret en ny indvindingsboring, 158.966, hvorefter indvindingen blev fordelt på 2 boringer mod tidligere hvor hele indvindingen fandt sted fra 1 boring, 158.841. I Figur 36 og Figur 37 er der foretaget en sammenligning af de 2 indvindingssituationer med hensyn til udbredelse af indvindingsoplande, transporttider og grundvandsdannende oplande.



Figur 36 Venstre figur øverst viser opstrøms partikelbaner ved indvinding fra begge boringer og venstre figur nederst viser de tilsvarende transporttider. Højre figur øverst viser opstrøms partikelbaner ved indvinding fra kun boring 158.841 lagt over partikelbaner fra indvinding fra begge boringer. Højre figur nederst viser transporttider ved indvinding fra kun 1 boring, 158.841



Figur 37 Venstre figur viser det grundvandsdannende opland og transporttider for situationen hvor indvindingen er ligeligt fordelt på vandværkets 2 boringer. Højre figur viser det grundvandsdannende opland og transporttider for situationen hvor hele indvindingen finder sted fra 158.841. Der ses kun mindre forskelle i oplandets udbredelse og transporttider ved de 2 forskellige indvindingsscenarier



Bredebro Vandværk, boring 158.841, 158.966 (3)

Figur 38 Illustration af hvordan partikelbanernes forløb er påvirket beliggenheden høj og lavpermeable geologiske enheder (voxler). Øverst til højre partikelbaner projiceret på et horisontalt lag (venstre figur), de 2 nederste profiler viser et større indehold af sandede elementer øst for indvindingsboringen som bevirker at partikelbanerne breder sig uden om den større ler-enhed syd for indvindingsboringen

Bilag 2. Grundvandets aldersfordeling beregnet ud fra partikelbaneberegninger

I dette bilag vises fordelingskurver for alderen af det infiltrerede grundvand til enkelte indvindingsboringer eller til de enkelte kildepladser. Aldersfordelingerne er beregnet på grundlag af scenarium D med nedstrøms partikelbanesimuleringer. Transporttiden fra grundvandsspejlet og ned til indvindingsfilteret er vist på x-aksen med grundvandets aldre i forskellige aldersintervaller. Den procentvise fordeling af aldre er vist på venstre y-akse og den akkumulerede hyppighed af aldre er vist på den højre y-akse. Dette er nærmere forklaret i Figur 1.



Figur 1 Eksempel på visning af grundvandets aldersfordeling: 33% af partiklerne når boringens indvindingsfilter på mellem 0 og 5 år, og 25% partiklerne når boringens indvindingsfilter på mellem 5 og 10 år (blå kurve). 91% af partiklerne når boringens indvindingsfilter på mellem 0 og 25 år (rød kurve)

Bilag 2



Figur 2. Aldersfordeling for Abild Vandværk, boring 166.711, indtag 2. Ingen af partiklerne har en transporttid på <u>under</u> 270 år



Figur 3. Aldersfordeling for Ballum Vandværk, boring 158.614 og 158.834



Figur 4. Aldersfordeling for Borg Vandværk, boring 158.621 og 158.622



Figur 5. Aldersfordeling for Daler Vandværk, boring 166.603 og 166.728

Bilag 2



Figur 6. Aldersfordeling for Højer Vandværk, boring 166.512 og 166.548. Partikler med en alder på <u>over</u> 40 år har alle en transporttid på mellem 5.400 og 22.000 år, dette gælder for 13% af partiklerne



Figur 7. Aldersfordeling Løgumgårde Vandværk, boring 159.1187



Figur 8. Aldersfordeling Løgumkloster Vandværk, boring 159.370 og 159.478



Figur 9. Aldersfordeling for Rørkær-Jejsing Vandværk, Kipkærvej, boring 167.1559
Bilag 2



Figur 10. Aldersfordeling for Rørkær-Jejsing Vandværk, Kærvej, boring 167.1562



Figur 11. Aldersfordeling for Sønder Sejerslev Vandværk, boring 158.817, 158.818 og 158.937



Figur 12. Aldersfordeling for Tønder Vandværk, boring 166.435



Figur 13. Aldersfordeling for Tønder Vandværk, boring 166.446

Bilag 2



Figur 14. Aldersfordeling for Tønder Vandværk, boring 166.462. Partikler med en alder på <u>over</u> 500 år har alle en transporttid på op til 5500 år, dette gælder for 2,5% af partiklerne



Figur 15. Aldersfordeling for Tønder Vandværk, boring 166.467



Figur 16. Aldersfordeling for Tønder Vandværk, boring 166.469



Figur 17. Aldersfordeling for Tønder Vandværk, boring 166.670



Figur 18. Aldersfordeling for Tønder Vandværk, boring 166.759



Figur 19. Aldersfordeling for Tønder Vandværk, boring 166.763



Figur 20. Aldersfordeling for Visby Vandværk, boring 158.618 og 158.683



Figur 21. Aldersfordeling for Øster-Gærup Vandværk, boring 166.511 og 166.724

Bilag 2



Figur 22. Aldersfordeling for Rens Vandværk, boring 167.1443



Figur 23. Aldersfordeling for Bredebro Vandværk, boring 158.84 og 158.966

Bilag 3. Partikelbanesimuleringer med Groundwater Vistas (version 6)

Partikelbanesimuleringer er i forbindelse med Tønder-modellen gennemført med 2 metoder, opstrøms (reverse) og nedstrøms (forward) partikelbaner (Bilag 1).

Den opstrøms partikelbanesimulering anvendes i denne sammenhæng som grundlag for den geografiske placering af partikler til nedstrøms partikelbaneberegninger. Desuden kan de opstrøms partikelbane simuleringer anvendes til beregning af indvindingsoplande og til beregning af transporttider langs partikelbanerne fra boring til grundvandsdannende område.

Nedstrøms beregning af partikelbaner benyttes til afgrænsning af indvindingsoplande og til afgrænsning af grundvandsdannende oplande samt til beregning af de totale transporttider for partiklerne fra de grundvandsdannende områder til indvindingsboringen.

I det følgende beskrives de anvendte procedure for:

- 1. Opstrøms (reverse) partikelbane simuleringer med Groundwater Vistas
- 2. Nedstrøms (forward) partikelbane simuleringer med Groundwater Vistas
- 3. Editering af output-filer med partikelbanesimuleringer (csv filer)
- 4. Import og editering af partikelbane filer i ArcMap

Særlige forhold for Groundwater Vistas:

I Groundwater Vistas kan indvindingsboringer implementeres på to måder, dels som analytiske boringer og dels som en randbetingelse. Fordelene ved at anvende analytiske boringer er at for boringer som har en udstrækning over flere modellag beregnes indvindingen fra de enkelte lag under hensyntagen til eventuelle variationer i hydraulisk ledningsevne. Desuden er programmets import og eksport funktioner mere udviklede til at håndtere analytiske boringer. I Tønder-modellen er der anvendt analytiske boringer. For boringer implementeret som randbetingelser kan hver boring eller alle boringer tilhørende den samme kildeplads tildeles et nummer ('reach number') som efterfølgende bruges til at selektere netop de partikler som er endt i den pågældende boring med det pågældende reach number ('plot capture points form MODPATH endpoint file'). Denne mulighed eksisterer ikke for analytiske boringer. For analytiske boringer kan der eksporteres en 'Endpoint Report' som indeholder en liste over alle partiklers endepunkt, og som derfor kræver en editering for at finde de partikler som er endt i den relevante boring.

Opstrøms (reverse) partikelbane simuleringer

- GV > Plot > Import model results > head file and cell-by-cell flow
- Gå til det lag hvor top af aktuelle indvindingsboring er placeret
- GV > AE > particle > circle
- Der placeres et antal koncentriske cirkler omkring indvindingsboringen
 - fx 2 cirkler med radius på henholdsvis 25m og 100m
 - top og bund lag for indvindingsboringens filter specificeres
 - Z offset = 0.5 betyder at partikler frigives midt i hvert filtersat lag
- OBS: Sæt 'Maximum Travel Time' til mindst 10.000 år (3.650.000 dage)

Trace Information	C Streamline	OK	1
Number 100 💾	Particle		
Spatial Parameters			
X: 12691.35	* Y: 9	50.41	± -
Top Layer 10	Z Offset	0.5	
Bottom Layer 12	Release Time	0	
Multiple Particles			
Number of Vertical Release	Points	1	
Minimum Z Offset	0		
Maximum Z Offset	1		
Optimization of Managed P	umping		
Weight	1		
Maximum Travel Time	1	0000000000	
			-
	600	2_1	+
			-

- GV > Model > Use MODPATH
- GV > Model > MODPATH > Packages
 - o I root file name bruges 'R' for reverse og 'F' for forward
- GV > Model > MODPATH > Particle tracking options > reverse

ackages > Root file name	Particle tracking options > Direction of tracking
MODPATH Packages	MODPATH Particle Tracking Options
Root File Name 48D-Ton467F C Package Include? Create? Edit Ca Main File Image: Comparison of the second s	Direction of Tracking Image: Compute Locations at Intermediate Times OK Incel Compute Locations at Intermediate Times Cancel Time Step Size 1 Max. Steps 10 Weak Sink Option Pass through weak sink 0.5 MODPATH Version 3 Options 1 1 Time at Start of Simulation 0 1 1st Stress Period to Process 1 1 Last Stress Period to Process 1 1 Last Time Step to Process 1 1 Limit Particle Travel Time Max. Travel Time 3650000 Use Existing CBF File 1 1 1

- GV > Model > MODPATH > create datasets (or press recalculate)
- GV > Model > MODPATH > run MODPATH
- GV > file > export > particle cords (csv)
 - Fx. Tønder467IndvOplOpl-r.csv (export all points ... Ja): Fil til afgrænsning af indvindingsopland og beregning af trnsporttider, importeres efter editering i GIS
 - Fx. Tønder467GvDanOplOpl-r.csv (export all points ... Nej): Fil til afgrænsning af grundvandsdannende opland, importeres efter edi-



tering i GIS. OBS denne fil er ikke anvendt i nærværende projekt, se Bilag 1

Partikler slettes ved:

• GV > edit > select all > particle > del

Import og genbrug af tidligere opstrøms partikelbaneopsætninger:

- AE > Import > Particle Text File > Pathline Files (*.plt)
 - Ved at svare 'Nej' til 'Use last position from particle file' anvendes partiklernes startposition i den efterfølgende partikelbanesimulering
- Herefter gentages:
- GV > Model > Use MODPATH
- GV > Model > MODPATH > Packages
 - I root file name bruges 'R' for reverse og 'F' for forward
- GV > Model > MODPATH > Particle tracking options > reverse

Nedstrøms (forward) partikelbane simuleringer

Ved nedstrøms partikelbaneberegninger placeres et antal partikler i et afgrænset område i modellag 1. Resultatet af den opstrøms partikelbanesimulering bruges til afgrænsning af området for frigivelse af partikler til den nedstrøms simulering, se nedenstående figur.

- Husk at slette partikler fra den opstrøms partikelbaneberegning
- Gå til modellag 1
- GV > ae > particle > digitize
 - Afgrænsning af område fra opstrøms partikelberegning <u>plus</u> en vis buffer zone, se nedenstående figur



- Vælg stor 'maximum travel time' > 3650000 dage
- Vælg placering af 16 partikler pr grid celle



- GV > Model > MODPATH > Packages
 - o I root file name bruges 'F' for forward
- GV > Model > MODPATH > Particle tracking options > forward
- GV > Model > MODPATH > Weak sink option > stop at weak sink

'ackages > Root file name	Particle tracking options > Direction of tracking Particle tracking options > Weak sink option
MODPATH Packages	MODPATH Particle Tracking Options
Root File Name 48D-Ton467F OK Package Include? Create? Edit Cancel Main File IV I IV IV IV Particles IV IV IV IV IV Well IV IV IV IV IV IV River IV IV IV IV IV IV IV Drain IV I	Direction of Tracking Forward OK Compute Locations at Intermediate Times Cancel Time Step Size 1 Max. Steps 10 Weak Sink Option Stop at weak sink 0.5 0.5 MODPATH Version 3 Options 0 1 1st Stress Period to Process 1 1st Time Step to Process 1 1 1 1 1 Last Stress Period to Process 1 1 1 1 1 1 Limit Particle Travel Time Max. Travel Time 3650000 1 1 1 1

- GV > Model > MODPATH > create datasets (or press recalculate)
- GV > Model > MODPATH > run MODPATH
- GV > file > export > particle cords (csv)
 - Fx. Tønder467GvDanOplOpl-f.csv (export all points ... Nej): Fil til afgrænsning af indvindingsopland, importeres efter editering i GIS
 - Fx. Tønder467IndvOplOpl-f.csv (export all points ... Ja): Fil til afgrænsning af grundvandsdannende opland og beregning af transporttider, importeres efter editering i GIS.



- GV > edit > select all > particle > del
 - GV 6.70 BUG: for at slette alle partikler (nedstrøms/forward) er det nødvendigt at tilføje nogle ekstra partikler i form af fx 'Line' hvorefter det er muligt at slette alle partikler:
 - GV > ae > particle > line
 - GV > edit > select all > particle > del

Bilag 3

Editering af csv / xlsx filer

- Tønder467IndvOplOpl-f.xlsx
 - TimeYear = Time/365 beregnes i ny kolonne
- Tønder467GvDanOplOpl-f.xlsx
 - Sortering efter 'end layer' => linjer med 'end layer' som ikke svarer til filterplacering slettes
 - Tjek 'end x' og 'end y' om de svarer til boringens placering, ellers slettes linjer
 - TimeYear = Time/365 beregnes i ny kolonne
- Tønder467IndvOplOpl-f.xlsx
 - For at sikre overensstemmelse med partikler/partikelbaner ved beregning af grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande anvendes 'partikel N' (kolonne A og B kopieret fra Tønder467GvDanOplOpl-f.xlsx) til udvælgelse af de tilsvarende partikelbaner i Tønder467IndvOplOpl-f.xlsx ved hjælp af funktionen 'LOPSLAG':

STDAFV.P ▼ (X ✓ fx =LOPSLAG(D2;A\$2:B\$634;2;FALSK)											
	Α	В	С	D LO	PSLAG(opsla	agsværdi; ta	belmatrix ; k	olonneindel	cs_nr; [lig_m	ed]) J	К
1	Particle N	Start X		Particle N	х	Y	Z	Time	Layer	TimeYear	lopslag
2	348	490412.5		1	490162.5	6092863	9.137701	0	1	0	=LOPSLAG(D2
3	351	490437.5		1	490174.9	6092852	6.8484	674.6364	2	1.848319	#I/T
4	352	490437.5		1	490177.6	6092850	6.453377	797.5515	2	2.185072	#I/T
5	353	490462.5		1	490202.5	6092840	4.6961	1482.63	3	4.062001	#I/T
6	354	490462.5		1	490250	6092823	2.790094	2525.507	3	6.919198	#I/T
7	355	490462.5		1	490261.1	6092816	1.4672	2745.397	4	7.521636	#I/T
8	357	490487.5		1	490277.1	6092805	-0.64957	3107.68	5	8.514191	#I/T
9	358	490487.5		1	490287.4	6092787	-3.7664	3664.178	6	10.03884	#I/T
10	359	490487 5		1	490299.5	6092765	-6 8832	4318 445	7	11 83136	#I/T

- Partikler som ikke bliver udvalgt ved 'LOPSLAG' slettes
- TimeYear = Time/365 beregnes i ny kolonne
- En alternativ metode til udvælgelse af de partikler som ved nedstrøms partikelbane beregninger ender i de relevante boringer er fra 'Endpoint Report' filen:

Particle	417	captured	at	(r:86,	c:117,	1:17) - Analytic Well 158-841_1
Particle	418	captured	at	(r:86,	c:117,	1:17) - Analytic Well 158-841_1
Particle	419	captured	at	(r:66,	c:116,	1:1) - River Reach Number 2
Particle	420	captured	at	(r:64,	c:116,	l:1) - Drain Reach Number O
Particle	421	captured	at	(r:86,	c:117,	1:17) - Analytic Well 158-841_1
Particle	422	captured	at	(r:86,	c:117,	1:17) - Analytic Well 158-841_1
Particle	423	captured	at	(r:64,	c:115,	1:1) - River Reach Number 2
Particle	424	captured	at	(r:66,	c:116,	l:1) - River Reach Number 2
Particle	425	captured	at	(r:86,	c:117,	1:17) - Analytic Well 158-841_1
						-

 Listen med de relevante partikelnumre fra 'Endpoint Report' filen benyttes til via 'LOPSLAG' at udvælge partikler og partikelbaner fra både 'Tønder467GvDanOplOplf.xlsx' og fra 'Tønder467IndvOplOpl-f.xlsx'

Import og editering af partikelbaner filer i ArcMap

- Add data > Tønder467GvDanOplOpl-f.xlsx
- Højre klik på importeret fil: display xy data
- X field og Y field: 'start x' og 'start y'
- Højre klik på '...events' fil:

M:\Tønder-model-2012\GIS\Tonde M:\Tønder467GvDanOplOpl-D3fr Tønder467GvDanOplOpl-D3fs Tønder467GvDanOplOpl-D3fs	erD-3	Tønder467GvDanOplC	15	Sølsted
M: (Ignder-model-2012)GIS (Kesul VvAnlaeg		Open Attribute Table Joins and Relates	1	
Indv.bor, vandværker M:\Tønder-model-2012\GIS\Tonde G. Q.Dan.Opl, Sce. D3		Zoom To Layer Zoom To Make Visible Visible Scale Range		Tyvse
M:\Tønder-model-2012\GIS\Tonde		Use Symbol Levels		
		Selection	•	
Abild711GvDanOpl-D3f		Label Features		
Ablid / I II nov Opi-D3t		Edit Features		
Abild711TranspTid-D3r Tonder435GvDanOpl-D3f Tonder446GvDanOpl-D3f		Convert Labels to Annotation Convert Features to Graphics Convert Symbology to Representation		
		Data	•	Repair Data Source
Iønder/59GvDanOpl-D3t Tønder/59GvDanOpl-D3t	0	Save As Layer File	\bigcirc	Export Data
	P	Create Layer Package		Export Data
	2	Properties		Make Pe Save this laver's data as a shapefile
Tønder469GvDanOpl-D3f			P	View Ite or geodatabase feature class
TimeYear		2	1	Review/Rematch Addresses

• Export til shape fil

.

- Yes til import af shape fil til ArcMap Layers
- Remove '...events' fil
- Layer: Tønder467GvDanOpl-f
 - Properties > Symbology > Quantities > Value: TimeYear
 - o 6 classes: 25, 50, 75, 100, 200, >200
- På tilsvarende måde importeres
 - Tønder467IndvOplOpl-f.xlsx
 - o Tønder467IndvOplOpl-r.xlsx