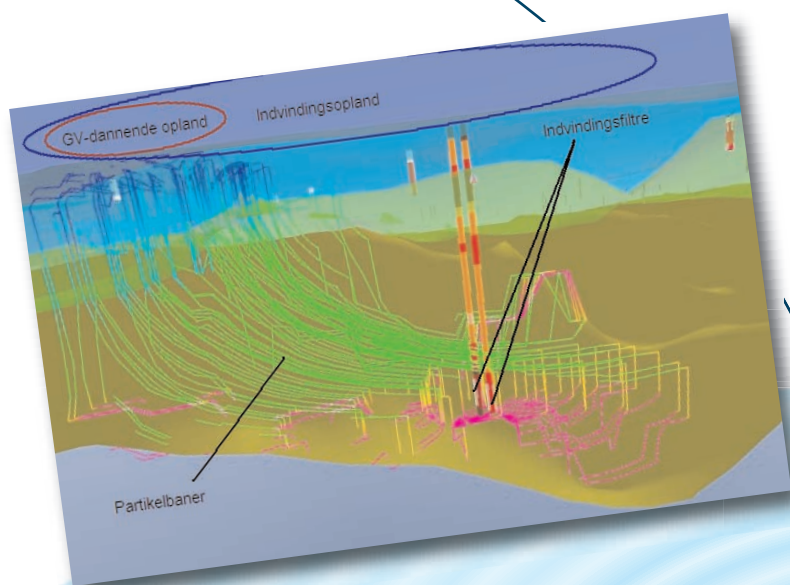


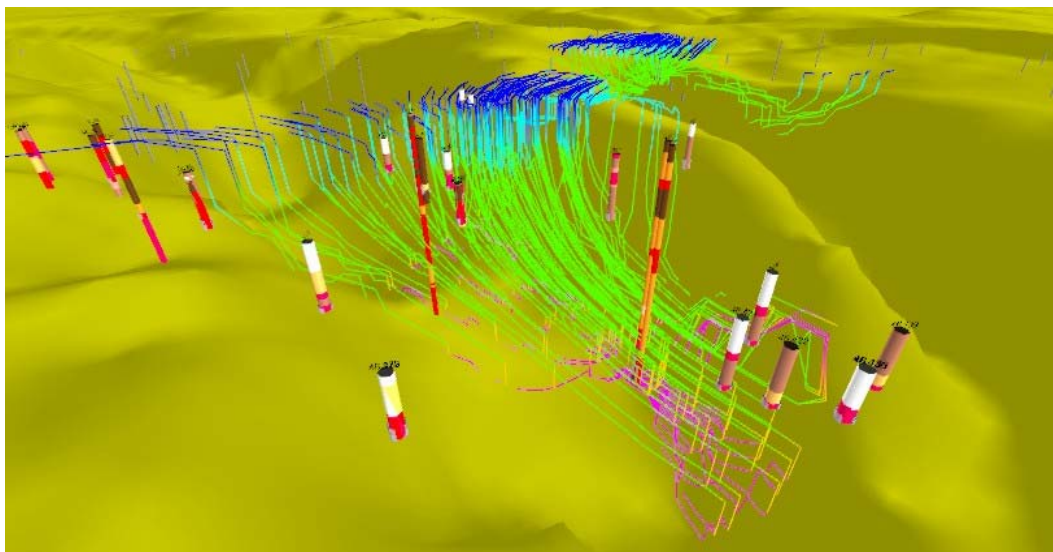
Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande (Del 1)

Vejledning i oplandsberegninger i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning

Claus Holst Iversen, Lisbeth Ulsøe Lauritsen,
Thomas Nyholm og Jan Kürstein

G E O - V E J L E D N I N G 2





Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande (del1)

Geo-Vejledning 2

Særudgivelse

Forsidefigur: Indvindings- og grundvandsdannende opland i 3D illustreret i programmet 3D-GeoScene. Indvindingen foregår 165 m under terræn i en begravet dal (Kilde: Breum og Roslev kildeplads i Salling).

Omslag: Henrik Klinge

Repro: GEUS

Oplag: 200

November 2008

Trykt: ISBN 978-87-7871-225-7

www : ISBN 978-87-7871-226-4

Vejledningen kan hentes på nettet : www.geus.dk

Pris (indbundet) : 200 kr.

© Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, GEUS

Øster Voldgade 10

DK-1350 København K

Telefon: 38142000

E-post: www@geus.dk

Udarbejdet i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsen, Miljøministeriet.

Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse	4
1. Indledning	9
2. Baggrund og formål	10
2.1 Baggrund.....	10
2.2 Formål.....	10
3. Teori: Oplandsbegrebet, parametergennemgang samt metoder til udpegning af oplande	12
3.1 Indledning.....	12
3.2 Definitioner,	13
3.3 Geologiske forhold	15
3.4 Vigtige og styrende parametre	16
3.4.1 Gradient og potentialeforhold	16
3.4.2 Usikkerheder på gradient- og potentialeforhold:.....	17
3.4.3 Transmissivitet /hydraulisk ledningsevne	18
3.4.4 Lækagekoefficient	21
3.4.5 Magasintal.....	22
3.4.6 Infiltration/grundvandsdannelse	23
3.4.7 Indvinding (Q).....	24
3.5 Metoder	25
3.5.1 Analytiske metoder.....	25
3.5.2 Numeriske metode	26
4. Analytiske indvindingsoplande	27
4.1 Indvindingsopland til en kildeplads med én boring	30
4.1.1 Fladt grundvandsspejl.	30
4.1.2 Gradient på grundvandspotentialet	33
4.2 Indvindingsopland til en kildeplads med flere boringer	38
4.2.1 Indvinding fra magasin med fladt vandspejl	38
4.2.2 Indvinding fra et magasin med gradient på grundvandspejlet	39
4.2.3 Indvinding fra flere grundvandsmagasiner	44
4.3 Indbygning af usikkerheder i oplandsstørrelser – størst på små indvindinger	45
4.4 AEM (Analytisk element metode)	46
4.5 Kontrol af oplandsarealer og afgrænsning af oplandet.....	47
5. Den numeriske metode	48
5.1 Hvad er en numerisk model	48
5.2 Krav til den geologiske model	49
5.3 Krav til den numeriske model	50

5.3.1	Grids: finite-difference vs. finite-element	50
5.3.2	Potentialeforhold	51
5.3.3	Bestemmelse og kalibrering af hydrauliske parametre	51
5.3.4	Vandbalance	52
5.3.5	Parametre som er styrende for beregningen af oplandet	53
5.3.6	Stationære vs. dynamiske modeller	54
5.4	Partikelbanesimuleringer	55
5.4.1	MODPATH partikelbanemodul	55
5.4.2	MIKE-SHE partikelbanemodul	56
5.4.3	Partikelbanesimuleringer, forlæns og baglæns modelkørsler	56
5.4.4	Håndtering af den umættede zone:	57
5.4.5	Usikkerheder, stokastiske oplande	58
5.4.6	Begrænsninger ved partikelbaneberegninger	59
5.5	Layout og figurer, hvordan præsenteres oplandene	60
5.5.1	GIS-temaer	60
5.5.2	Partikelendepunkter	62
5.5.3	Partikelaldre	62
5.5.4	Stokastiske oplande og figurer	64
5.5.5	Figurer og data der bør udarbejdes og gemmes:	66
5.5.6	Sammenstilling og tolkning af opland	67
5.6	Sammenfatning	71
6.	Aflevering til kommunerne	73
7.	Fremgangsmåde og anbefalinger	75
7.1	Valg af analytisk eller modelberegnete oplande	75
8.	Hvad projektgruppen anbefaler at der arbejdes videre med i 2. del af projektet:	87
9.	Appendiks:	90
9.1	Appendiks A	90
9.2	Appendiks B Status for udpegningerne i amterne	91
9.3	Indledning	91
9.4	Nordjyllands Amt	92
9.5	Ringkøbings Amt:	93
9.6	Viborg Amt	94
9.7	Århus Amt	95
9.8	Vejle Amt	96
9.9	Ribe Amt:	97
9.10	Sønderjyllands Amt	98
9.11	Fyns Amt	99
9.12	Vestsjællands Amt	100
9.13	Storstrøms Amt	101
9.14	Roskilde Amt	102
9.15	Frederiksborg Amt	103

9.16	Københavns Amt.....	104
9.17	Bornholms Amtskommune	105
10.	Litteraturliste:	106

Forord

Med Folketingets vedtagelse af tillæg til Vandforsyningsloven i 1998 blev det besluttet, at der over en årrække skulle foretages en nærmere kortlægning af grundvandsressourcerne i Danmark med henblik på at beskytte disse for fremtiden. Grundvandskortlægningen blev i 2003 indbygget i Miljømålsloven, og blev indtil 2006 udført af de nu nedlagte amter. Opgaven videreføres nu af Statens Miljøcentre.

Som støtte for den nationale grundvandskortlægning udarbejder GEUS faglige vejledninger for forskellige emner af grundvandskortlægningen. Disse vejledninger udgives i serien Geo-Vejledninger, og skal blandt andet kunne tjene som fagligt grundlag for de udbud af kortlægningsopgaver, som miljøcentrene foretager.

En vigtig disciplin inden for grundvandskortlægningen er bestemmelsen af indvindings- og grundvandsdannende oplande. Formålet med denne Geo-Vejledning er, at Statens Miljøcentre, efter afsluttet kortlægning, skal være i stand til at beregne og optegne indvindings- og grundvandsdannende oplande for områdets vandværker samt dokumentere hvordan, og under hvilke forudsætninger, udpegningen er foregået. Dokumentation og GIS-temaer skal efter endt kortlægning videregives til kommunerne, så oplandene kan benyttes i forbindelse med kommunernes indsatsplanlægning og sagsbehandling.

Nærværende Geo-Vejledning, der er en af de første i serien, sammenfatter erfaringer fra amterne og rådgiverne, og kommer med anbefalinger til, hvordan man beregner og fastlægger indvindings- og grundvandsdannende oplande. Rapporten er udarbejdet i samarbejde med de Statslige Miljøcentre, og GEUS.

Arbejdsgruppen har bestået af:

Claus Holst Iversen, GEUS
Lisbeth Ulsøe Lauritsen, Miljøcenter Odense
Jan Kürstein, Miljøcenter Roskilde
Thomas Nyholm, Miljøcenter Århus

Følgegruppen har undervejs i forløbet bidraget i de faglige diskussioner og med kvalitetssikring af den færdige rapport. Følgegruppen har bestået af:

Mads Kjærstrup, Miljøcenter Ringkøbing
Cosic, Zijad, Miljøcenter Aalborg
Clea Schneider, Miljøcenter Ribe
Anne Esbjørn, Miljøcenter Ribe
Dirk-Ingmar Müller-Wohlfeil, Miljøcenter Odense
Jens Asger Andersen, Miljøcenter Roskilde
Christian Wiene Jensen, Miljøcenter Nykøbing F.
Rasmus Rønde Møller, GEUS
Susie Mielby, GEUS
Anker Lajer Højberg, GEUS

Følgegruppen har deltaget i en temadag omkring oplande, der blev afholdt i Miljøcenter Århus i marts 2008, hvor deltagerne havde mulighed for at komme med kommentarer og kritik

af projektgruppens arbejde med Geo-vejledningen. På samme møde blev der fremlagt forslag til mulige fremtidige del-2-projekter som skal understøtte en videre udbygning af Geo-Vejledningen i en revideret del-2 udgave, der forventes udarbejdet i løbet af 2009. Lars Troldborg, GEUS og Thomas Wernberg, ALECTIA har bidraget med idéer og forslag til det videre arbejde med udarbejdelsen af del-2-projekter.

Endelig en særlig tak til Anne Mette Nielsen, Bente Nedergaard og Rasmus Rønde Møller, GEUS for korrekturlæsning og faglig sparring undervejs i forløbet.

Projektgruppen anbefaler at Geo-vejledningen revideres i takt med at resultaterne fra de igangsatte del-2-projekter bliver afrapporteret.

1. Indledning

Statens miljøcentre overtog i 2007 den gebyrfinansierede grundvandskortlægning efter amterne. Efter at miljøcentrene nu er samlet under den samme myndighed, er der opstået et behov for en ensretning i metoderne for udpegning af vandværkernes indvindings- og grundvandsdannende oplande.

Denne Geo-vejledning er skrevet for at give nogle fælles retningslinjer på det faglige område mht. oplande, men også i forhold til hvordan man rent administrativt afgrænser oplandene.

Geo-vejledningen beskriver trinvis, hvordan indvindingsoplande bør inddrages i overvejelser i løbet af kortlægningsarbejdet. Dette skal ske for at sikre den optimale dataindsamling og bearbejdning af de hydrologiske data, der ligger til grund for udpegning af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande.

Vejledningen er et resultat af arbejdet i en arbejdsgruppe nedsat af GEUS med deltagelse af Miljøcenter Århus, Miljøcenter Roskilde og Miljøcenter Odense. Gruppen har arbejdet i perioden fra efteråret 2007 til foråret 2008.

Der arbejdes i 2009 videre med Geo-vejledningen i en del 2, hvor der på baggrund af anbefalinger fra projektgruppen og følgegruppen behandles relevante emner i et udredningsarbejde, som fagligt skal støtte Geo-vejledning del 2 om Indvindings- og grundvandsdannende oplande.

2. Baggrund og formål

2.1 Baggrund

Amterne har indtil 2007 stået for grundvandskortlægningen, herunder optegning af indvindingsoplande til vandværker. De første oplandsafgrænsninger er typisk udført ved brug af simple analytiske beregningsmetoder. Miljøstyrelsen udgav i 1995 "Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen, Nr. 8, "Metoder til udpegning af indvindingsoplande" (Miljøstyrelsen, 1995). I takt med at amterne i forbindelse med gebyrkortlægningen fik kortlagt indsatsområder, blev indvindingsoplandene typisk genberegnet på baggrund af nye data og partikelbanesimuleringer fra grundvandsmodeller. Grundvandsmodeller er generelt blevet anvendt til at beregne både indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande.

Det har tidligere været op til det enkelte amt at afgøre, hvor stor en usikkerhed man har ønsket at indbygge i indvindingsoplande og hvor langt tilbage mod grundvandsskel, man har valgt at optegne sit opland. Amterne har også haft forskellig praksis for, hvordan man har behandlet indvindings- og grundvandsdannende oplande i forbindelse med udarbejdelsen af indsatsplaner. Endelig har der været stor forskel på om amterne har valgt at offentliggøre deres beregnede oplande på regionplanskort, eller om oplandene kun har været tilgængelige til intern brug i forbindelse med sagsbehandlingen.

Udpegningen af indvindings- og grundvandsdannende oplande har stor betydning for prioriteringen af grundvandsbeskyttende foranstaltninger og kan få store konsekvenser for de lodsejere, som ejer de pågældende arealer. Som eksempler på grundvandsbeskyttende foranstaltninger kan nævnes oprydning af forurenede grunde, støtte til miljøvenligt jordbrug, skovrejsning m.v. Grundvandsbeskyttelse kan blive dyrt og det er derfor vigtigt, at det bliver gjort på et sammenligneligt grundlag i hele landet.

2.2 Formål

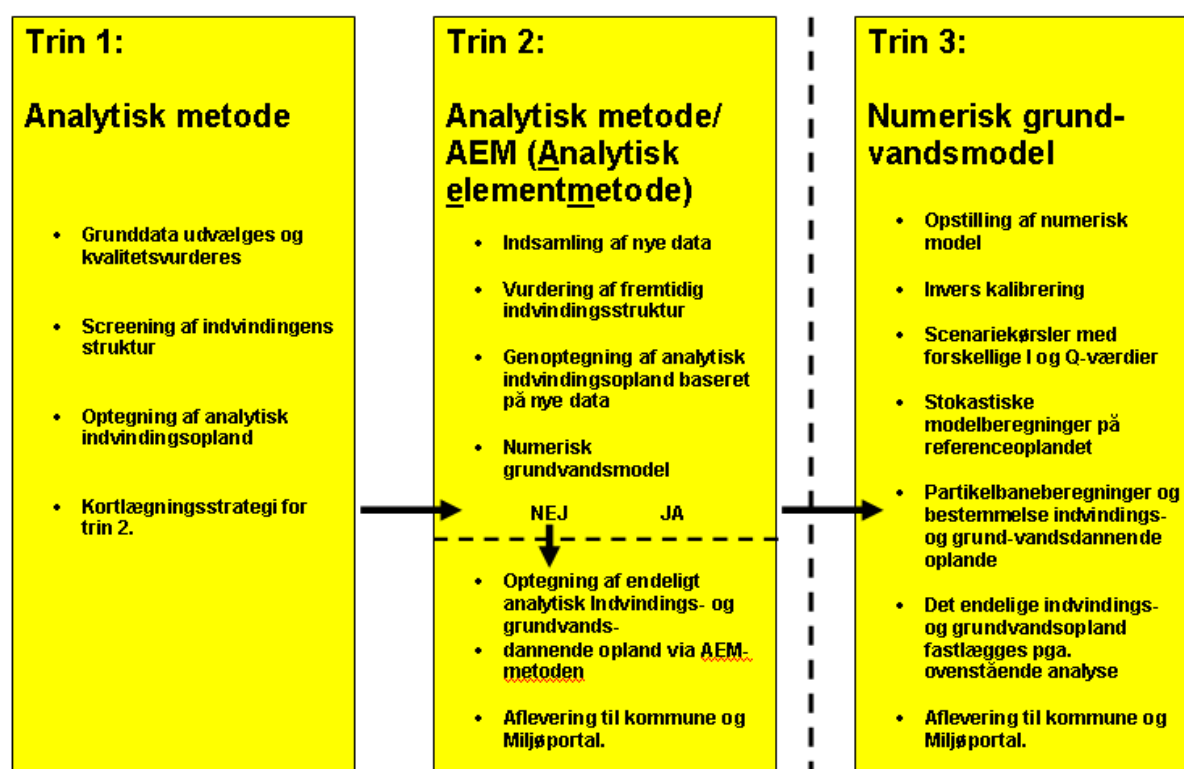
Det er formålet, at vandværkerne efter endt kortlægning får optegnet et indvindingsopland og et grundvandsdannende opland så præcist som muligt. Da grundvandsmagasineres udbredelse normalt varierer i tre dimensioner, bør oplandsudpegningerne som udgangspunkt optegnes ud fra dynamiske grundvandsmodeller, der kan håndtere både geologiske og hydrologiske variationer i 3 dimensioner over tid. Der kan dog være forhold, der taler for at der visse steder anvendes mere simple analytiske oplandsberegninger.

Det er hensigten med denne Geo-vejledning, at Statens Miljøcentre, efter afsluttet grundvandskortlægning, skal være i stand til at udarbejde GIS-kort over indvindings- og grundvandsdannende oplande for områdets vandværker, samt dokumentere hvordan, og under hvilke forudsætninger, udpegningerne er foretaget. Kort og dokumentation skal efter endt kortlægning videregives digitalt og på papir til kommunerne, så oplandene kan benyttes i forbindelse med kommunernes indsatsplanlægning.

Projektgruppen har i sit arbejde og i anbefalingerne lagt op til, at udpegninger af indvindings- og grundvandsdannende oplande kan inddeles i 3 trin (jf. figur 2.1). Disse 3 trin bør således tænkes ind i hele kortlægningsforløbet fra start til slut. De 3 *trin* består af følgende:

Trin 1, den analytiske metode, som det anbefales at udføre i den indledende fase af kortlægningen. **Trin 2**, den analytiske metode AEM (Analytisk Element Metode), der udarbejdes på baggrund af nye kortlægningsresultater. Man kan her vælge ikke at opstille en numerisk grundvandsmodel og således udelukkende fastlægge oplandet ud fra AEM-metoden. Projektgruppen har meget sent i forløbet fået kendskab til AEM-metoden og derfor er metoden ikke tilstrækkeligt beskrevet i nærværende vejledning, men vil blive undersøgt nærmere i en del 2 af projektet (jf. afsnit 8). **Trin 3**, her beregnes oplandet ud fra en numerisk grundvandsmodel, hvilket generelt anbefales at man foretager for alle oplande med mindre det ikke er muligt at opstille en numerisk model i det pågældende område, hvor så oplandsberegningen afsluttes med AEM under *Trin 2*.

De ovennævnte 3 trin vil blive nærmere beskrevet i kapitel 7 under "Fremgangsmåde og anbefalinger" og vil således være gennemgående i hele Geo-vejledningen. Kapitel 7 skal ses som et opsamlende kapitel der beskriver fremgangsmåden i oplandsbestemmelsen og som særskilt kan læses med henvisninger til specifikke problemstillinger omkring beregning og optegning af oplande i de foregående kapitler.



Figur 2.1 Beskrivelse af de 3 trin i forbindelse med bestemmelse af oplande.

3. Teori: Oplandsbegrebet, parametergennemgang samt metoder til udpegning af oplande

3.1 Indledning

I forbindelse med indvinding fra en boring, hvor der pumpes vand op fra et magasin, vil der nede i grundvandsmagasinet ske et trykfald rundt om boringen, trykfaldet breder sig i tiden efter pumpestart. Trykfaldet vil få vand fra det påvirkede område til at strømme hen mod boringen. Området, der er påvirket af trykfaldet i grundvandspotentialet og leverer vand til indvindingen, kaldes for indvindingsoplandet, mens det område ved terræn, der bidrager med nedbør som grundvandsdannelse til indvindingen, kaldes for det grundvandsdannende opland.

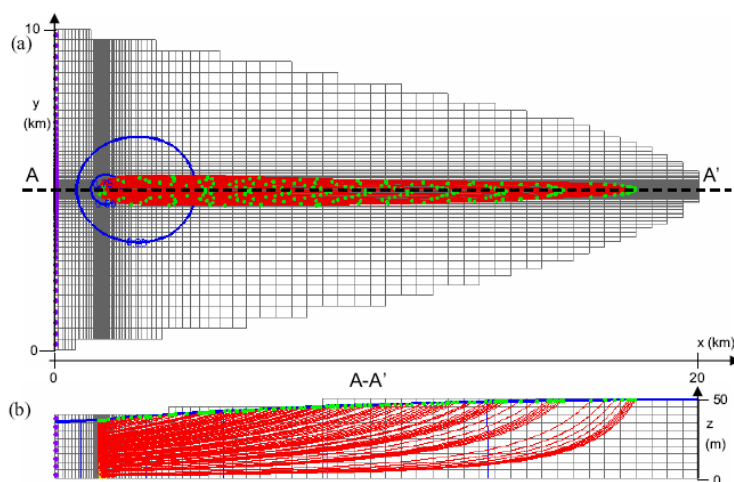
Oplandets form og udbredelse er styret af mange forskellige fysiske egenskaber, som kan beskrives ud fra geologien og de parametre, som kendes inden for hydrogeologien. Indvindingens dybde og størrelse og fordeling på boringer har også afgørende betydning for oplandets udbredelse og størrelse. Oplandene er nogle komplekse størrelser, som er svære at kortlægge med 100 % sikkerhed, da der kan forekomme en del ukendte parameterverdier. Oplandenes udbredelse er i deres natur dynamiske og de udbreder sig og indskrænker sig over tid som følge af variationer i oppumpning og nedsivning.

Administrativt ønskes indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande udpeget som stationære områder, der ikke ændrer sig over tid. De skal derfor være så robuste i deres udbredelse, at det forventes, at de dækker det virkelige opland i en gennemsnits-situation. Dette skal ses i lyset af, at det ikke er hensigtsmæssigt og administrativt at arbejde efter oplandsgrænser, der ændrer sig over tid.

I de følgende afsnit vil der blive præsenteret definitioner på oplandsbegreber samt givet en kort gennemgang af de parametre og forhold, der er styrende for afgrænsningen af indvindings- og grundvandsdannende oplande, herunder gives også en vurdering af parametrene's kvalitet. Til sidst vil det kort blive præsenteret, hvilke to metoder, der kan anvendes til oplandsudpegninger, den simple analytiske metode, og den mere avancerede numeriske metode.

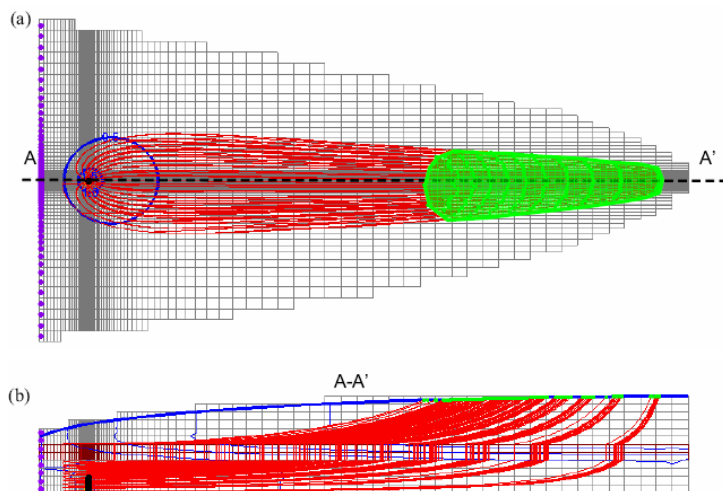
3.2 Definitioner,

Et **indvindingsopland** til en boring er defineret som det område i magasinet, hvor grundvandet strømmer hen imod indvindingsboringen. Indvindingsoplandet er endvidere defineret af de strømlinier, som markerer grænsen mellem vand, der indfanges af indvindingsboringen, og vand der ikke indfanges. Indvindingsoplandet skal dermed opfattes som et 3D-legeme, inden for hvilket alle vandpartikler før eller siden vil havne i indvindingsboringen (Sonnenborg T. O. & Henriksen H. J, 2005).



Figur 3.1 Indvindingsopland for et frit magasin med det grundvandsdannende område (grønne prikker) og påvirkningsområdet (blå cirkel på figur a). (a) Horisontalt snit med opland set fra oven. (b) Vertikalt snit gennem samme område som ses øverst. De røde linier angiver strømlinier mellem grundvandsspejl og indvindingsfilter. De grønne partikler angiver, hvor vandpartiklerne siver ned i jorden, svarende til det grundvandsdannende opland (efter Sonnenborg og Henriksen, 2005).

Det **grundvandsdannende opland** til en boring er defineret som det areal på jordoverfladen, der afgrænser området, hvor vand infiltrerer ned til grundvandsspejlet og strømmer videre ned til det filter der indvindes fra, og pumpes ud af det pågældende magasin. (Sonnenborg & Henriksen, 2005).



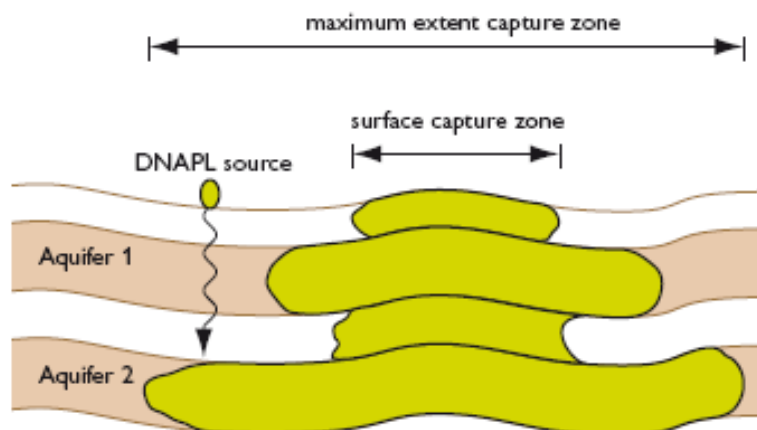
Figur 3.2 Figur (a) Horisontalt snit gennem området set fra oven, som skitserer både indvindings- og det grundvandsdannende område for et spændt magasin. (b) Vertikalt snit midt gennem området vist nederst. De røde linier angiver strømningslinierne mellem grundvandsspejlet og indvindingsfilteret. De grønne partikler angiver, hvor vandpartiklerne siver ned i jorden, svarende til det grundvandsdannende opland (efter Sonnenborg og Henriksen 2005).

Referenceopland: Referenceoplandet er det indvindings- og grundvandsdannende opland, som fremkommer, når denne beregnes ud fra den tilladte indvindingsmængde Q_{tilladte} som et gennemsnit over de sidste 3-5 år ($\text{m}^3/\text{år}$), og hvor den gennemsnitlige netto-nedbør/infiltration er anvendt. Samtidig er de hydrauliske parametre i de betydelige aquiferer og aquitarder fastholdt i forhold til den oprindelige model.

Skelne imellem indvindings- og det grundvandsdannende opland

Det er en god idé fra start at skelne imellem indvindingsoplandet og det grundvandsdannende opland, da arealerne hver især har betydning for grundvandsbeskyttelsen. Indvindingsoplandet er som oftest større end det grundvandsdannende opland i spændte magasiner, og sammenfaldende når magasinet er frit. Derfor vil det samlede oplandsareal altid blive større og dermed opnå sin maksimale udbredelse, når indvindingsoplandet medtages i udpegningen af det samlede opland (jf. figur 3.3).

Det kan derfor godt i forbindelse med Indsatsplanlægningen være en god ide at være opmærksom på, at ikke alle stoffer, der siver ned fra jordoverfladen uden for det grundvandsdannende opland, men inden for indvindingsoplandet, er uskadelige. Klorerede stoffer og andre flygtige benzinformbindelser kan godt, hvis de siver ned i indvindingsoplandet, fortsætte ned i det primære magasin og så videre blive opfanget af indvindingen (jf. figur 3.3). På den anden side vil konservative stoffer, som f.eks. nitrat, ikke nå indvindingsfiltret, hvis stoffet siver ned i indvindingsoplandet. Det er kun den mængde nitrat, som siver ned i selve det grundvandsdannende opland, som via advektiv transport vil strømme til det pågældende indvindingsfilter.



Figur 3.3 Konceptuel 3-D forståelsesmodel, der viser både indvindingsoplandet ("maximum extent capture zone") og det grundvandsdannende opland ("surface capture zone") (efter Frind, E.O. et. al., 2002).

3.3 Geologiske forhold

Udformningen og udbredelsen af et opland afhænger i høj grad af områdets geologiske opbygning.

Indvindingsboringer filtersættes normalt i magasinbjergarter med forholdsvis høj permeabilitet, der kan lede vand fra omgivelserne ind til boringen. Strukturen og sammensætningen af sedimenterne i magasinet opstrøms indvindingsboringerne er afgørende for dets evne til at lede vandet, og for hvor langt ud indvindingsoplandet behøver at brede sig for at kunne levere tilstrækkeligt vand til indvindingen.

For mindre grundvandsmagasiner kan selve magasinafgrænsningen være vigtig for strømningsretningen, da vandet har lettere ved at strømme gennem højpermeable sand- og kalklag frem for tætte lerlag.

De øverste dæklag over grundvandsmagasinet er afgørende for udbredelsen af indvindingsoplandet og styrende for størrelsen og fordelingen af grundvandsdannelsen. I lerjord vil der normalt ikke foregå så stor en grundvandsdannelse som på sandjord, idet der tilbageholdes mere vand i leret, som enten kan optages af planterne, eller løbe af som overfladeafstrømning til dræn og vandløb.

Den geologiske sammensætning af lagene ovenpå magasinet kan have indflydelse på, om magasinet er henholdsvis frit eller spændt. Mægtige lerlag over et grundvandsmagasin skaber ofte spændte forhold i magasinet, hvor potentialet har en højere kote end toppen af det pågældende magasin. Det er ikke uden betydning, om et magasin er frit eller spændt i forhold til oplandlandsberegninger, da sænkningstragten breder sig betydelig hurtigere i et spændt magasin, end i et frit magasin. Dette bevirker, at indvindingsoplandet til et spændt magasin ofte er større i forhold til det frie magasin. Indvindingsoplandet for det spændte magasin er ofte større end det grundvandsdannende opland. For det frie magasin er der ofte sammenfald mellem indvindingsoplandet og det grundvandsdannende opland.

3.4 Vigtige og styrende parametre

Beskrivelse af vigtige parametre, der indgår i oplandsberegninger

I det følgende gives der en kort gennemgang af geologiske forhold og parametre, som er af afgørende betydning, når man skal fastlægge udbredelsen af et indvindings- eller grundvandsdannende opland. I forbindelse med parametergennemgangen vil der også blive givet en kvalitetsvurdering af data.

3.4.1 Gradient og potentialeforhold

Grundvandspotentialer er et udtryk for grundvandets potentielle energi og angives i meter over havniveau, svarende til koten for det frie vandspejl. Grundvandspotentialer visualiseres ofte gennem et potentialekort med optegnede ækvipotentialelinier for hver 1-5 meter intervaller. Grundvandet vil forsøge at strømme fra højere mod lavere potentialeforhold. Vandet vælger den korteste vej, med den størst mulige hydrauliske ledningsevne eller høj transmissivitet. Strømningen foregår vinkelret på ækvipotentialelinierne, og hvis potentialelinierne er optegnet detaljerede nok, vil potentialekortet afspejle de variationer i den hydrauliske ledningsevne, der findes i magasinet.

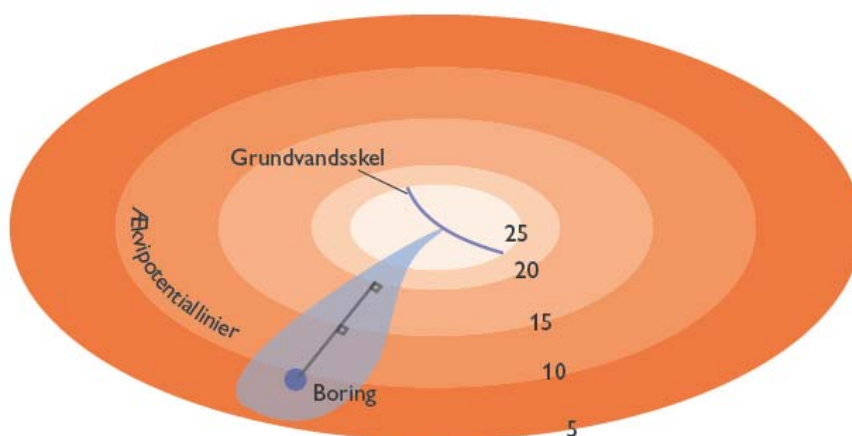
Grundvandspotentialer og det strømningsmønster, de afspejler, er afgørende for udformningen og retningen af oplandet. Grundvandspotentialer er vigtige for såvel oplandsberegninger udregnet med analytiske metoder og for numeriske grundvandsmodeller. For de analytiske oplande er det gradienten på grundvandspotentialet og strømningsmønstret, der er afgørende. I den numeriske grundvandsmodel benyttes pejlinger fra hele området, og modellen beregner så gradient og strømningsretning for det pågældende område.

Grundvandspotentialer kortlægges primært ud fra pejlinger af vandstand i borer. Koter for vandspejl i vandløb, søer, hav og terræn kan for frie magasiner anvendes som

sekundær information om grundvandsspejlets beliggenhed, og kan inddrages som støt-
tepunkter til optegning af potentialelinjer.

Gradientforholdene kan bestemmes ud fra gradienten (h), som kan udtrykkes ved ligning 3.1, hvor s er afstanden målt vinkelret på ækvipotentialelinierne og h er ændringen i potentialeniveauet over afstanden s . Gradienten (h) er dimensionsløs.

$$\text{Gradient (h)} = \frac{\partial h}{\partial s} \quad \text{Formel 3.1}$$



Figur 3.4. Indvindingsoplandet optegnes i overensstemmelse med strømningsforholdene i området. På figuren ses grundvandskoter optegnet som ækvipotentialelinier for et grundvandsmagasin. Oplandet, markeret med grå, følger strømlinierne op til grundvandsskel.

3.4.2 Usikkerheder på gradient- og potentialeforhold:

Kvaliteten af grundvandspotentialer fra borer og præcisionen på potentialekort kan være meget varierende. Hvis pejlinger f.eks. ikke er foretaget synkront inden for en ganske kort periode, men i stedet er opmålt med flere års mellemrum, hvor grundvandsstanden pga. forskelle i våde og tørre år har fluktueret, kan det have stor betydning for kvaliteten af det optegnede potentialekort.

De mest troværdige pejlinger stammer fra boringer med målepunktskoter, der er indmålt med nivellement eller differentiel-GPS. Pejleboringer, der ikke er indmålt, men kotesat ud fra højdekort, kan bidrage med store fejl i optegning af potentialekortet, og kan let levere 1-2 meters fejl på koten. Endelig kan en entydig og fast målreference i forhold til hvor man pejler sin vandspejlskote også være en væsentlig kilde til usikkerheder i registreringen af potentialeforholdene.

Et godt og gennearbejdet potentialekort optegnes med udgangspunkt i et tæt net af pejlinger opmålt i en synkronpejlerunde. Hvis sådanne ikke findes i den indledende kortlægning, må man ofte nøjes med spredte grundvandspotentialer opmålt med flere års mellemrum, hvor grundvandsstanden godt kan variere pga. våde og tørre år.

De ovennævnte usikkerheder er særligt udtalte i områder, hvor der ikke ses store variationer i potentialeforholdene og hvor gradienten er meget beskeden. Her vil selv relativt små fejl på f.eks. 0,5 til 1,0 meter på potentialet få stor betydning for strømningsretningen. Det kan give anledning til, at strømningsretningen tolkes forkert og oplandene placeres forkert.

3.4.3 Transmissivitet /hydraulisk ledningsevne

Transmissiviteten, T [m^2/s] er et udtryk for det vandførende lags evne til at lede vandet. T er et produkt af magasinets hydrauliske ledningsevne, K [m/s] og tykkelsen, b [m] på det vandførende lag. T er en parameter, som relaterer til geologien, og kan således variere indenfor et magasin, da den er styret af kornstørrelser, sorteringsgrad og cementeringsgrad og evt. sprækker i magasinbjergarten, samt varierende tykkelser af magasinet. Til oplandsberegninger kan der benyttes T -værdier beregnet på forskellig vis og af varierende kvalitet:

T-værdier på baggrund af prøvepumpningsforsøg med flere boringer

De mest troværdige transmissivitets værdier udregnes på baggrund af større prøvepumpningsforsøg, hvor der indgår såvel pumpe- som observationsboringer filtersatte i samme grundvandsmagasin. T -værdierne repræsenterer en slags gennemsnits-transmissivitet inden for et givent område, hvor der er udført pejlinger.

T-værdier på baggrund af renpumpning med pejling i indvindingsboringer

Foreligger der ikke egentlige prøvepumpningsdata kan renpumpningsdata ofte benyttes til at udregne en lokal transmissivitetsværdi omkring en indvindingsboring. Renpumpningsdata kan være vedlagt som bilag til indvindingsstilladelser. Renpumpning udføres ofte med konstant ydelse over et par timer eller op til et døgn, hvor sænkingsforløbet af vandspejlet i pumpeboringen pejles i tiden efter pumpestart og igen efter pumpestop.

Plottes sænkningen som funktion af logaritmen til tiden t efter start/stop af pumpen i et semilogaritmisk koordinatsystem, vil grafen gennem punkterne tilnærmelsesvis afbildes som en ret linje (Cooper-Jacobs metode). Tilnærmelsen gælder for de tilfælde, hvor

$$\frac{Tt}{r^2 S} < 0,5 \quad \text{Formel 3.2}$$

det vil sige hvor radius indtil centrum i indvindingsboringen er tilstrækkelig lille eller tiden er tilstrækkelig stor. Pumpeboringen kan anvendes til at pejle i, eftersom radius ud til filteret fra centrum i boringen er lille.

Sænkningen s kan tilnærmelsesvis beregnes som

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S} \quad \text{Formel 3.3 (Jacob's formel)}$$

Formel 3.2 kan omskrives til

$$s = \frac{2,30Q}{4\pi T} \log \frac{2,25T}{r^2 S} + \frac{2,30Q}{4\pi T} \log t \quad \text{Formel 3.4}$$

Sammenhængen mellem sænkningen s og $\log(t)$, er en ret linje med hældningen

$$m = \frac{2,30Q}{4\pi T} \quad \text{Formel 3.5}$$

Sænkningen Δs svarende til tiden over en dekade ($\log 10 = 1$) kan aflæses på grafen.

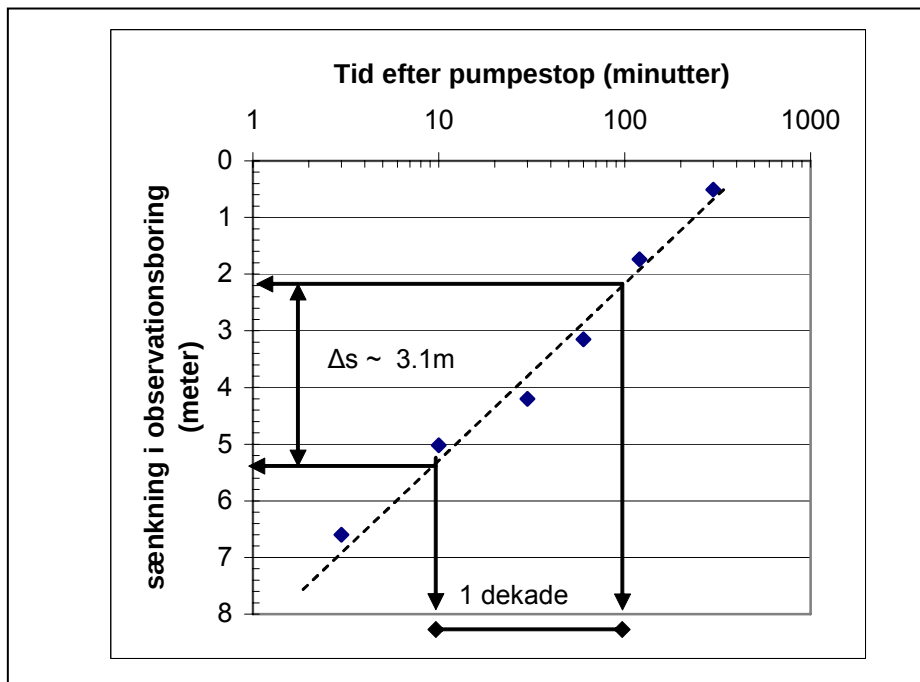
Transmissiviteten kan udregnes idet sammenhængen til Δs er:

$$\Delta s = \frac{2,30Q}{4\pi T} \quad \text{Formel 3.6}$$

Hvilket svarer til at transmissiviteten, T , udregnes som

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta s} \quad \text{Formel 3.7}$$

(efter Bai, W., 1990).



Figur 3.5 Eksempel på en semilogaritmisk afbildning af sammenhørende data af tid og sænkning målt under en reetableringsfase efter renpumpning (efter Bai, W. & Kærsgaard, H., 1982).

Der er dog usikkerheder ved at benytte indvindingsboringen til at registrere sænkninger, idet der er en vis borehulseffekt pga. vandvolumenet i boringen giver anledning til en forsinket stigning i starten af pumpe-/etableringsperioden.

T-værdier beregnet/skønnet ud fra boringers specifikke kapacitet

Der kan være tilfælde, hvor renpumpningsdata ikke er tilgængelige, hvor de eneste oplysninger der er gemt er pumpekapalet Q , pumpetiden t , og sænkningen i pumpeboringen (s) og radius (r_w) ud til pumpeboringens filter. Det kan være endnu mere sparsomt, så kun boringens specifikke kapacitet Q/s kendes.

Ud fra formel 3.2 kan der opstilles en ligning til beregning af T :

$$T = \frac{0,183Q}{s_w} \log \frac{2,25Tt}{r_w S} \quad \text{Formel 3.8}$$

Hvor s_w er sænkningen i pumpeboringen og r_w er filterradius i pumpeboringen.

T kan nu beregnes/skønnes ved at indsætte de værdier man har kendskab til, og sætte skønnede værdier ind for resten. I tilfælde af mangelfulde oplysninger, kan der som standardværdier anvendes $t = 1$ døgn, $r = 15$ m) og $S = 0,0004$ for spændte magasiner og $0,1$ for frie magasiner (Miljøstyrelsen, 2007).

Som det fremgår af formlen, indgår T på begge sider af ligningen. Man kan benytte en slags iterativ proces, hvor man i første omgang gætter sig til en T -værdi som indsættes i

formlen. Den T-værdi, som beregnes herved, kan anvendes på ny i samme formel som et bedre input til at udregne en mere korrekt T-værdi.

T beregnet på grundlag af undertiden mangelfulde renpumpninger kan dog være væsentlig undervurderet på grund af boringernes lave virkningsgrad. Der er derfor store usikkerheder forbundet ved at anvende den specifikke kapacitet som et mål for T, da boringens tekniske udførelse kan have stor indflydelse på boringens ydelse (Sørensen, T., 1985).

T-værdier på baggrund af skøn af hydrauliske ledningsevner.

Hvis der ikke foreligger oplysninger på T-værdier, kan der gives et overslag på T på baggrund af tabelværdier. Dette gøres ved at vælge en erfaringsværdi for den hydrauliske ledningsevne for den pågældende magasintype, og dernæst gange den med tykkelsen af magasinet.

T-værdier på baggrund af MRS sonderinger.

Nye undersøgelser tyder på, at den geofysiske metode MRS-sonderinger er velegnet til at estimere hydrauliske ledningsevner og derved også T-værdier på magasin niveau ned til ca. 80 meters dybde (Nielsen et. al. , 2008).

3.4.4 Lækagekoefficient

Hvis der indvindes vand fra et spændt magasin overlejret af ler, vil lerets hydrauliske egenskaber være afgørende for, hvor meget vand der frigives ved lækage til det underliggende magasin. Lækagekoefficienten beskriver således resistansen af det overliggende lerlag.

Lækagekoefficienten m [s^{-1}] for et spændt magasin er defineret som forholdet mellem den vertikale hydrauliske ledningsevne K_z og tykkelsen b' af det overliggende lavpermeable dæklag (Bear, 1979).

$$\text{Lækagekoefficienten } m [s^{-1}] = K_z / b' \quad \text{Formel 3.9}$$

Lækagekoefficienten kan bestemmes ud fra langtidsprøvepumpninger (minimum 2-3 uger). Ud over pumpeboringen kræves der som minimum 1 observationsboring filtersat i det samme magasin, men det anbefales dog, at der inddrages flere observationsboringer fordelt rundt om indvindingen, både i det aktuelle lag, men også i magasiner, der evt. befinder sig over eller under lækagelaget, for at kunne belyse lækageforholdene i forskellige retninger rundt om kildepladsen.

Lækagekoefficienten kan også kalibreres i en numerisk model, hvis man har troværdige potentialemålinger fra et øvre og nedre magasin, som er adskilt af det pågældende læ-

kagelag. Lækagefaktoren vil ofte under danske forhold findes i størrelsesordenen $10 \times 10^{-9} - 10 \times 10^{-10} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ (Københavns Amt & Madsen, B. , 2004).

3.4.5 Magasintal

Magasintallet S , som er en dimensionsløs parameter, udtrykker det vandførende lags evne til at opmagasinere eller afgive vand i forhold til det samlede volumen.

S bestemmes ud fra langtidsprøvepumpninger (minimum 2-3 uger), og der kræves ud over pumpeboringen som minimum 1 observationsboring filtersat i det samme magasin.

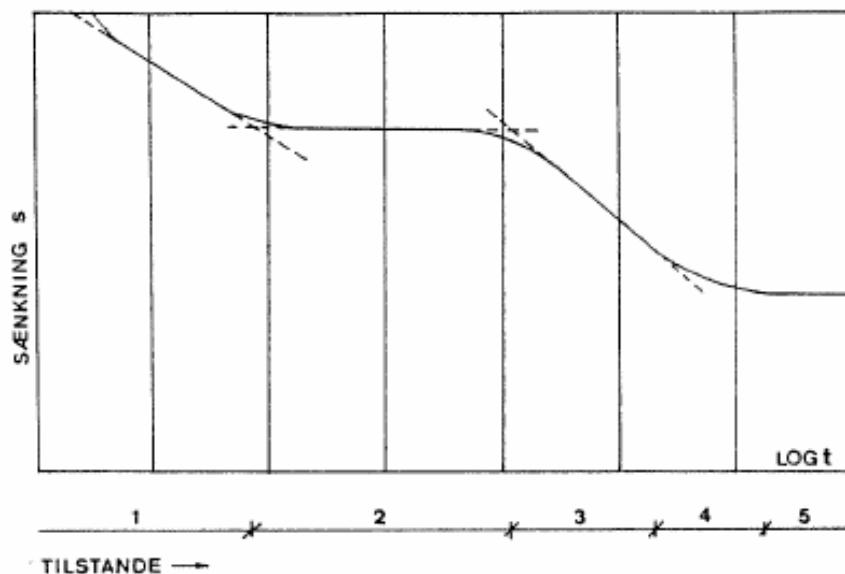
Jordens evne til at afgive vand kan beskrives ud fra 2 typer mekanismer: *fri dræning* (ved grundvandsspejlet) og *sammentrykkelighed* (i den mættede zone). Derfor kan S også beskrives ud fra 2 forskellige parametre; enten som den **specifikke ydelse S_y** eller som det **specifikke magasin S_s** .

Magasintal for magasiner med frit vandspejl

I magasiner med frit vandspejl vil der frigives vand ved såvel dræning og som følge af sammentrykkelighed. Bidraget fra dræning ved grundvandsspejlet er dog langt det største og magasintallet S , sættes derfor i praksis lig S_y . Magasintallet S_y er i størrelsesordenen 0,05 - 0,2 for sandlag, mens den for lerede og siltede aflejringer typisk ligger inden for intervallet 0,01 – 0,1. (Bai, W. & Kærgaard, H., 1982).

Magasintal for magasiner med spændt vandspejl

Oppumpning af vand fra et spændt magasin vil skabe en sænkningstragt i grundvandspotentialet omkring indvindingsboringen. Sænkningstragten vil brede sig for at skaffe vand nok til oppumpningen. I starten (svarende til tilstand 1 på fig. 3.6) sker al vandfrigivelse som følge af kornskelettets sammentrykkelighed, pga. trykfaldet i grundvandet omkring boringen.



Figur 3.6 Typisk trinvis sænkingsforløb i en pejleboring ved konstant oppumpning fra et artesisk magasin (efter Bai, W., 1990).

Vandmængden svarende til en sænkning af porevandstrykket på 1 meter vandsøjle betegnes det specifikke magasintal, S_s . I sand og kalklag er S_s ofte i størrelsesorden 10^{-5} . For at få udregnet et magasintal, der repræsenterer hele laget, skal det specifikke magasintal multipliceres med lagtykkelsen. Typiske værdier for magasintal i grundvandsmagasiner med spændt vandspejl vil ligge i intervallet $1-10 \times 10^{-4}$ (Københavns Amt, & Madsen, B. 2004). I spændte magasiner, hvor magasintallet er lille, sker udbredelsen af sænkningstragten hurtigere end i frie magasiner.

Magasintal S_T for samlet lagpakke

Hvis en indvinding fortsætter over en længere periode i et spændt magasin vil trykfaldet forplante sig opad i de overliggende lag, indtil det når op til det frie vandspejl. Det **totale magasintal**, S_T , kan da opstilles som summen af de enkelte lags bidrag af S_s inklusiv S_y fra den frie dræning (Bai, W. & Kærgaard, H., 1982).

Tilstand 3 på figur 3.6 viser en periode, hvor sænkningen af det frie vandspejl er væsentlig, hvor magasintallet $S = S_T$.

3.4.6 Infiltration/grundvandsdannelse

Infiltrationen (I), også kaldet nettonedbøren, har afgørende betydning for udbredelsen og arealet af indvindings- og det grundvandsdannende opland. Infiltrationen kan bestem-

mes ud fra den observerede nedbør fratrasket den aktuelle fordampning, samt den overfladenære afstrømning fra vandløb og dræn.

Infiltrationen kan variere meget. Den vil være størst i de øvre magasiner uden lerdække, og hvor der forekommer en nedadrettet gradient. Nedbør vil i højere grad løbe af som overfladisk afstrømning til vandløb og dræn i områder med stor lerdække i de øvre lag, og hvor der findes en opadrettet gradient.

Det er værd at bemærke, at indvindingen kan være med til at øge infiltrationen inden for et opland ved at sænke grundvandspotentialerne, mens der indvindes fra magasinet.

I områder, hvor flere magasiner overlejrer hinanden og indbyrdes er adskilt af lerlag, vil infiltrationen til de nedre magasiner være styret af lækagelag og forskel i trykforhold. Infiltrationen til de nedre magasiner vil ofte være betydelig mindre end til de øvre magasiner.

I den numeriske grundvandsmodel indgår infiltrationen som fast parameter der lægges ind i det øverste lag i modellen. Under opstillingen af den numeriske grundvandsmodel, udføres der et større arbejde med at integrere flere forskellige datatyper for at estimere grundvandsdannelse til de underliggende lag i modellen, så den afspejler de hydrogeologiske forhold i modelområdet (jf. afsnit 5.3.5).

3.4.7 Indvinding (Q)

Indvindingsoplandets areal er direkte proportionalt med indvindingens størrelse og øges således i takt med at vandværkets indvinding øges, og derfor er denne parameter især vigtig at holde styr på.

I amterne har der været forskellig praksis for, hvilken indvindingsmængde der er anvendt i optegningen af indvindingsoplande. Nogle amter har beregnet oplande på baggrund af den gennemsnitlige faktiske indvinding over et år, mens andre har lavet beregninger på baggrund af den tilladte indvinding pr. år. Indvindingstilladelserne er typisk ca. 25 % højere end den årlige faktiske indvinding.

Oplysninger om hvordan indvindingen er fordelt på de enkelte indvindingsboringer har kun indflydelse på beregningerne, hvis der er tale om en bestemt indvindingsstrategi fra vandværkets side. Det kan f.eks. være tilfældet, hvor borerne på kildepladsen er forsynet med pumper, der giver anledning til forskellige mønstre i indvindingen, eller hvis en indvindingsboring er taget ud af drift pga. forurening etc.

Hvis der ikke foreligger oplysninger, eller kan indhentes oplysninger om, hvordan indvindingen sker på kildepladsen, fordeles indvindingen ligeligt på alle borer.

Delvis filtersætning

Mange indvindingsboringer er kun delvist filtersat i magasinet, og det er relevant at overveje om den delvise filtersætning har betydning for oplandenes udbredelse. Bear, J., 1979 gennemgår eksempler for forskellige typer magasiner og konkluderer, at der boringsnært under oppumpning er et ekstra tryktab, der resulterer i et lavere potentiale i og ved pumpeboringen. Ved afstande fra pumpeboringen på mere end 1,5-2 gange magasyntykkelsen kan effekten af en delvis filtersætning negligeres for isotrope magasiner hvor ledningsevnen $k_z = k_x$.

3.5 Metoder

3.5.1 Analytiske metoder

Det er muligt ud fra simple ligninger og antagelser at beregne sig frem til et bud på et analytisk opland til en indvindingsboring. Ligningerne bygger på forudsætninger om, at grundvandsmagasinerne har samme tykkelse overalt, er opbygget af en ensartet geologi og er uendelig i udstrækning. Desuden forudsættes det, at indvindingsboringen har en uendelig lille diameter, og at indvindingen sker med konstant oppumpning. Den analytiske metode vil blive gennemgået mere udførligt i næste kapitel.

For mindre indvindinger er oplandsberegninger relativt usikre at udføre og det anbefales, at oplande der årligt indvinder mindre end 50.000 m³/år optegnes svarende til en tilladelse på 50.000 m³/år (jf. anbefaling side 36).

For kildepladser med flere boringer bør indvindingen fordeles ud på de enkelte boringer, hvis indvindingsmønsteret ikke er oplyst. Men som udgangspunkt optegnes der indvindings- og grundvandsdannende oplande for alle boringer som indgår i kildepladsens tilladelse.

Der vil være tilfælde i forbindelse med den efterfølgende indsatskortlægning, hvor der bliver sat fokus på at finde nye kildepladser. Det vil her være oplagt at regne på udbredelsen af de nye oplande, både ved hjælp af den analytiske metode og hjælp af den numeriske grundvandsmodel. Hvis der etableres en kildeplads som med stor sandsynlighed tages i brug eller får status af en reservekildeplads, bør oplandet medtages i kortlægningsresultaterne.

3.5.2 Numeriske metode

Det bedste bud på afgrænsning af et indvindingsopland og det grundvandsdannende opland fås ved at opstille en geologisk model for det kortlagte område, efterfulgt af en numerisk grundvandsmodel.

En numerisk model er en model, hvor man formulerer en numerisk tilnærmelse til de styrende ligninger. Tilnærmelsen fremkommer ved, at man inddeler det betragtede område i et endeligt antal elementer. Den numeriske model beskriver kun de processer, som foregår i den mættede del under grundvandspejlet. Modellen kan enten være opbygget som en stationær eller en dynamisk model. I den stationære numeriske grundvandsmodel må man specificere den arealdistribuerede grundvandsdannelse med en given fordeling over modelområdet. I den dynamiske model kan denne fordeling yderligere antages at være tidsafhængig. I en dynamisk model er input til modellen f.eks. daglige nedbørs- og fordampnings- og temperaturværdier (Miljøstyrelsen, 2000).

Til grundvandsmodellen er der ofte tilknyttet modelkoder som f.eks. partikelbanemodulet MODPATH, som kan anvendes i forbindelse med beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande. En mere udførlig beskrivelse af den numeriske metode følger i kap. 5.

4. Analytiske indvindingsoplande

Resumé

Det anbefales at lade analytiske indvindingsoplande optegne under henholdsvis trin 1 og 2 i den nationale grundvandskortlægning. Formålet med optegningen af indvindingsoplande i de tidlige stadier af kortlægningen, er at sikre et godt og gennemtænkt datagrundlag for oplandsberegningerne og til den senere numeriske grundvandsmodel.

Dette kapitel omhandler, hvordan man ud fra simple beregninger og antagelser kan give et bud på udbredelsen af et indvindingsopland til en kildeplads, afhængig af, om der er indvindes fra fladt eller hældende vandspejl, en eller flere borer, eller fra et eller flere magasiner.

Anbefalingerne og flere af figurerne i dette kapitel er inspireret af Miljøstyrelsens vejledning (Miljøstyrelsen, 1995) der beskriver, hvordan man kan regne sig frem til indvindingsoplande for kildepladser med én indvindingsboring, samt af Nordjyllands Amts vejledning fra 2003, (Nordjyllands Amt, 2003), der omhandler tilfælde med flere indvindingsboringer.

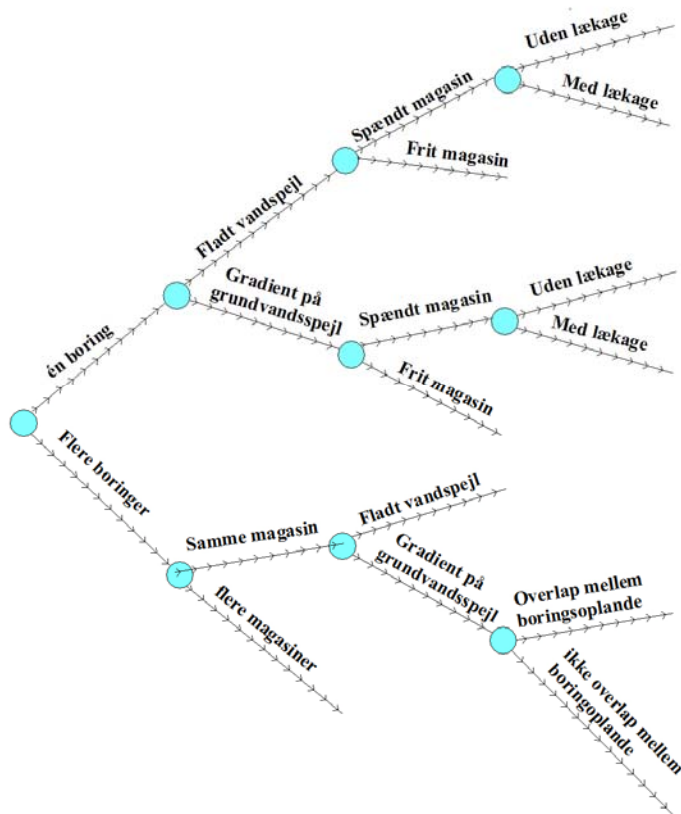
Kapitlet afsluttes med en anbefaling til en endelig oplandsafgrænsning for de tilfælde, hvor der undlades at opstille en numerisk grundvandsmodel. Her anbefales det at beregne det endelige opland ud vha. den Analytiske element metode (AEM), som er et analytisk beregningsprogram, der kan inddrage flere informationer end de simple ligninger fra den traditionelle analytiske metode er i stand til. Metoden vil kort blive beskrevet senere i dette kapitel (afsnit 4.4), men vil i del 2 af Geo-vejledningen blive mere grundigt beskrevet.

Afdækning af magasinforhold og inputparametre til oplandsberegninger

I forbindelse med optegning af et analytisk opland er det vigtigt fra starten at gøre sig bevidst om, hvilket magasin vandværket indvinder fra, eftersom det kan have afgørende indflydelse på retningen af tilstrømningen af vand til vandværksboringerne:

- Er det et snævert afgrænset magasin, eksempelvis en dal, eller et udbredt magasin som f.eks. en hedeslette?
- Er der forholdsvis stillestående vand med fladt grundvandspotentiale, eller gradient på grundvandspotentialet svarende til retningsbestemt strømning i området?
- Er magasinet spændt eller har det frit vandspejl?
- Hvordan er borerne placeret i forhold til hinanden, og indvinder de fra samme magasin?

- Hvordan er indvindingen fordelt på borerne?



Figur 4.1 viser frem til hvilken metode, som kan anvendes til at optegne oplandet med, hvilket er fastlagt ud fra lokale borings- og magasinforhold.

Det er varierende fra område til område, hvor mange data der er til rådighed og hvilken kvalitet de har. I områder hvor der er mange data til rådighed, bør de mest anvendelige og repræsentative data indgå i oplandsberegningerne. Tabel 4.1 viser et skøn på parameterusikkerheder fra Miljøstyrelsens vejledning, (Miljøstyrelsen, 1995).

Parameter:	Skønnede usikkerhed:
Oppumpning	Ingen sikkerhed
Nettonedbør	+/- 50 %
Transmissivitet _{prøvepumpning}	+/- 40 %
Magasintal _{prøvepumpning}	+/- 40 %
Lækage _{prøvepumpning}	+/- 50 %
Transmissivitet _{Kortmateriale}	+/- 80 %
Magasintal _{Kortmateriale}	+/- 80 %
Lækage _{Kortmateriale}	+/- 80 %
Gradient:	+/- 20 %

Tabel 4.1 Skønnede parameterusikkerheder på forskellige datatyper (Miljøstyrelsen, 1995).

Til beregning af gradienter på grundvandspotentialet kan man vælge at anvende et eksisterende potentialekort, men det anbefales, at tjekke om potentialekortet nu også giver det bedste bud på gradienten omkring boringen, eller om gradienten faktisk bliver bedre bestemt ved at udregne den direkte ud fra grundvandsstande i boringer. Det bør derfor undersøges, hvilke pejlinger der findes fra boringer filtersatte i samme magasin henholdsvis opstrøms og nedstrøms pumpeboringen. Boringernes målepunkter skal helst være nøje opmålt og i de tilfælde, hvor der foreligger flere pejlinger, vil det være mest oplagt at benytte pejlinger fra boringer, der er pejlet nogenlunde samtidigt og gerne så nye pejlinger som muligt.

Anbefaling:

Det anbefales, at gradienten på grundvandsspejlet beregnes ud fra pejlinger, der er foretaget i samme magasin, som indvindingsboringerne er filtersat i.

Som det fremgår af kap. 3, er der flere metoder til at beregne transmissiviteten (T) på. De er som nævnt ikke alle lige pålidelige. Til den analytiske oplandsbestemmelse anbefales følgende prioriterede rækkefølge til beregning af T:

1. Regionale T-værdier bestemt ud fra længerevarende prøvepumpninger med inddragelse af flere pejleboringer.
2. Lokale T-værdier bestemt ud fra renpumpningsdata hvor pumpeboringen også er anvendt som pejleboring.

3. Regionale T-værdier bestemt ud fra MRS-sonderinger (kan bruges ned til ca. 80 meters dybde).
4. Lokale T-værdier bestemt ud fra den specifikke kapacitet.
5. Skønnede og empiriske T-værdier ud fra forventede hydrauliske ledningsevner og faktiske tykkelser af vandmættet magasin.

Anbefaling:

Det anbefales, at man i analytiske beregningssituationer, hvor der foreligger flere T-værdier, bruger tid på at finde de mest troværdige T-værdier nær borerne. Hvis der er flere værdier, anvendes en middelværdi eller en værdi lidt lavere for at være på den sikre side.

Datablad med oplandsoplysninger

Eftersom der kan være store usikkerheder forbundet med optegning af analytiske oplande, er det vigtigt at videregive de overvejelser man gør sig i forbindelse med optegningerne. Det anbefales derfor, at man samtidig med optegningen, udfylder et datablad i et regneark for hver kildeplads og opland med alle relevante oplysninger. (Anbefalinger til opbygning af datablad vil blive fastlagt senere i Geo-vejledningens del 2).

Anbefaling:

Det anbefales, at man samtidig med optegningen af analytiske indvindingsoplande, udfylder et datablad med alle relevante oplysninger om kildepladsen og det tilhørende opland, der har indflydelse på oplandsbestemmelsen.

4.1 Indvindingsopland til en kildeplads med én boring

I det følgende skelnes der mellem indvindinger fra områder med fladt vandspejl og indvindinger, der sker i områder med hældende vandspejl.

4.1.1 Fladt grundvandsspejl.

I naturen vil det være sjældent at finde områder med helt fladt grundvandspotentiale, men metoden vil også med fordel kunne anvendes i områder med svag grundvands-

strømning, hvor datadækning er så usikker, at der er tvivl om gradient og strømningsretning.

4.1.1.1 Fladt vandspejl - spændt magasin uden lækage

For et spændt magasin uden vandtilførsel og ovenfra lækage kan sænkningstragten og dermed indvindingsoplandet i tilfælde af horisontalt grundvandsspejl beskrives med Theis-ligningen som en cirkel, hvor sænkningstragten udbreder sig i takt med tiden efter pumpestart, (Nordjyllands Amt, 2003).

$$R = \sqrt{\frac{2,25 \times T \times t}{S}} \quad \text{Formel 4.1}$$

Hvor R = Radius på oplandet, svarende til sænkningstragtens radius (m).

T = Transmissivitet (m²/s).

t = tiden efter pumpestart (s)

S = Magasintal

Som nævnt i kap. 3, under afsnittet om magasintal, er det næppe realistisk at tro, at man kan indvinde fra et spændt magasin, uden at der efter en vis tids pumpning vil ske lækage fra overliggende lag. Det er dog muligt, at lækagebidraget kan være meget lille, hvis magasinet overlejres af et tykt fedt lerlag.

Et andet problem er, at formelen udtrykker at radius på oplandet løbende øges i takt med tiden efter pumpestart. Oplandet vil i virkeligheden ikke fortsætte med at brede sig i det uendelige. På et tidspunkt når oplandet frem til områder, hvor forudsætningerne ikke længere er opfyldt. Det kan være at magasinet horisontalt afgrænses af lerlag, eller der kan ske en ændret lækagetilførsel fra oven fra f.eks. et vandløb.

Det bør derfor overvejes om formel 4.1 er den rette at optegne oplande ud fra. I så fald bør man grundig overveje, hvilken tid man skal anvende i beregningen.

Stationære forhold kan opnås i forbindelse med en positiv hydrologisk grænse som f.eks. et vandløb. Man kan her vælge at indsætte en tid så tilpas stor, at sænkningstragten har nået til nærmeste positive/ negative grænse.

Alternativt kan man vælge at tildele området en lav infiltration og beregne radius ud fra formel 4.11 (afsnit 4.5), der anvendes til kontrol af oplandsstørrelser.

4.1.1.2 Fladt vandspejl - Spændt magasin med lækage og infiltration fra overliggende lag

Som nævnt vil der efter en tids pumpning i et spændt magasin opstå en midlertidig situation som kan vare uger eller måneder, hvor lækage fra overliggende lag opnår en ligevægtsagtig tilstand med den givne oppumpede vandmængde.

Radius af sænkningstragten vil da bestemmes som:

$$R = 1,123 \times \sqrt{\frac{T}{\left(\frac{K_z}{b'}\right)}} \quad \text{Formel 4.2}$$

Hvor:

R = radius af sænkningstragten

T = transmissivitet (m^2/s)

K_z/b' er en lækagekvotient, der kan bestemmes fra prøvepumpning. b' er tykkelsen af det overliggende lavpermeable lerlag og k_z er z-komponenten af lerlagets hydrauliske ledningsevne.

Efter længere tids pumpning fra et spændt magasin, vil sænkningen af potentialet i det spændte magasin medføre, at vandspejlet sænkes i de overliggende lag. Derefter er forudsætningerne for formel 4.2 ikke længere opfyldt.

Hvis et vandværk indvinder efter en strategi, hvor de kun pumper periodevis og tærer på rentvandsbeholderen i de timer/minutter, hvor de har slukket for pumpen, kan man forestille sig at udbredelsen af sænkningstragten afbrydes og må bygges op helt eller delvis næste gang pumpen starter. I så fald er det måske muligt, at indvindingen kan holdes indenfor kan lækage tilstanden svarende til tilstand 2 (jf. figur 3.6, side 23).

Hvis vandværket mere eller mindre pumper uafbrudt, må man formode, at de efter en tid indvinder svarende til tilstand 3 eller 4 på figur 3.6. I tilstand 3 trækkes der vand fra vandspejlet i lagene over magasinet. Sænkningerne vil herefter fortsætte under udnyttelse af lagseriens samlede lagpakke, indtil sænkningstragten i et eller andet niveau i lagserien møder et vandløb eller en kyst og indleder en påvirkning af afstrømningen. Radius af sænkningstragten kan herefter bestemmes med formel 4.1 ved indsætning af hele lagfølgens samlede magasintal (S_T) og hele lagfølgens samlede transmissivitet (T_T) i følge (Bai, W., 1990). Tilbage står problemet igen med, hvilken tid, t , skal oplandet beregnes ud fra.

Umiddelbart vil det mest oplagte være, at lade oplandet brede sig til nærmeste vandløb eller sø, svarende til tilstand 4 (figur 3.6, side 23), hvor en positiv grænse nås og lade radius til sø eller vandløb blive radius i det cirkulære opland.

Anbefaling:

For et spændt magasin med fladt vandspejl anbefales det, at lade oplandet brede sig til nærmeste vandløb eller sø, der vurderes at udgøre en robust grænse. I kystnære områder udgør kysten en naturlig grænse.

Fladt vandspejl - Frit magasin

I tørre perioder, typisk forår til efterår, vil infiltrationen af nedbør være lille til frie magasiner og i de perioder vurderes Theis-ligningen at kunne beskrive sænkningstragts udbredelse i det frie magasin som for spændte magasiner uden lækage

$$R = \sqrt{\frac{2,25 \times T \times t}{S}} \quad \text{formel 4.3}$$

R= radius sænkningstragt,

T= transmisivitet, $T = b \cdot K$, hvor b er tykkelsen på den vandmættede del af magasinet. T bestemmes bedst ved prøvepumpning ellers jævnfør ovennævnte prioriteringsrækkefølge.

S= magasintallet (for frit magasin), bestemmes ved prøvepumpning.

I vinterhalvåret tilføres området nettonedbør og her indskrænkes oplandsbredden. Miljøstyrelsens vejledning, (Miljøstyrelsen, 1995) anbefaler, at man kan regne maksimale oplande ved at indsætte en tidlig værdi svarende til varigheden af et sommerhalvår og herved fås det maksimale opland.

I forbindelse med oplandsoptegnelsen, bør det overvejes, om der inden for det påtænkte opland er negative geologiske barrierer som oplandet formes efter, eller om der er vandløb eller søer, som kan bidrage med vand og er med til at mindske oplandsstørrelsen.

Anbefaling:

For frie magasiner med fladt vandspejl anbefales det at lade oplandet optegne efter formel 4.3 og indsætte en tid (t), svarende til sommerhalvåret, hvor der ikke dannes grundvand af betydning.

4.1.2 Gradient på grundvandspotential

De fleste indvindingsboringer er placeret i områder, hvor der er en baggrundsstrømning med hældende vandspejl.

4.1.2.1 Gradient på vandspejl - spændt magasin uden lækage

Hvis man ser på idealtilfældet, hvor strømningen er ensartet og der sker en strømning over et område med konstant gradient på grundvandspotential uden infiltration fra oven, kan man sammenstille udtrykket for den naturlige strømning med sænkingsberegninger for spændt grundvandsmagasin uden lækage og nå frem til 3 formler (4.4-4.6),

der beskriver et parabelformet indvindingsopland til én indvindingsboring (Miljøstyrelsen, 1995).

- Stagnationspunkt $= \frac{Q}{2 \times \pi \times I \times T}$ Formel 4.4

- Oplandsbredde ved boring $= \frac{Q}{2 \times I \times T}$ Formel 4.5

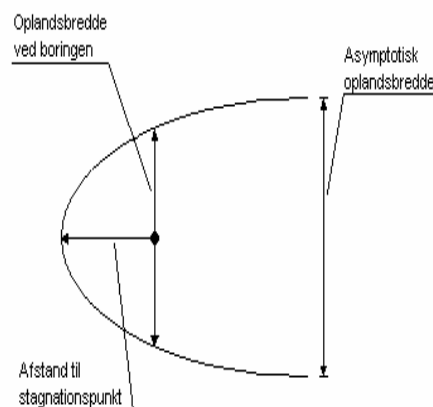
- Asymptotisk oplandsbredde $= \frac{Q}{I \times T}$ Formel 4.6

hvor,

Q = oppumpningen (m³/s)

I = grundvandspejlets gradient

T = transmissivitet (m²/s)



Figur 4.2. Illustration af begreberne; afstand til stagnationspunkt, oplandsbredde ved boringen og asymptotisk oplandsbredde (efter Nordjyllands Amt, 2003).

Der har været stor forskel på, hvilke data amterne har anvendt i formlerne til optegning af oplande. Eksempelvis kan oppumpningen, Q, fortolkes som den faktiske gennemsnitlige indvinding (m³/år) beregnet ud fra årlige oplysninger om indvindingsmængder eller som en gennemsnitlig indvinding beregnet på baggrund af den årlige tilladelse. Endelig kan man også vælge at lade Q beregne ud fra den maksimale døgnindvinding.

Det anbefales generelt at der anvendes den tilladte indvinding $Q_{\text{tilladelse}}$ når oplande beregnes ud fra den analytiske metode (jf. anbefaling side 36).

For at ensrette brugen af formlerne, anbefales det at følge vejledningen fra Nordjyllands Amt (Nordjyllands Amt, 2003). Boringsnært benyttes maksimal døgnindvinding, mens tilladelsen benyttes til beregning af asymptotisk oplandsbredde. Herved sikres det, at størrelsen af det analytiske opland er fremtidssikret og derved tager højde for en eventuel øget indvinding.

Selv ved brug af indvindingstilladelsen og den maksimale indvinding vil oplandene ofte blive smalle og usikre for de små vandværker. I nærværende vejledning anbefales det at indbygge en ekstra sikkerhedsmargen for små oplande ved at runde alle mindre tilladelser op til 50.000 m³/år. Den ekstra sikkerhedsmargen, som medtages i de foreløbige oplande i trin 1 og 2, skal være med til at sikre, at der bliver kortlagt i et større område end kun inden for de snævre "haler", som oplandet ud fra tilladelse ellers kan resultere i.

Formlerne 4.4 – 4.6 omskrives til:

- Stagnationspunkt $= \frac{Q_{\text{maksdøgn}}}{2 \times \pi \times I_{\text{klp.}} \times T_{\text{klp.}}}$ formel 4.7

- Oplandsbredde ved boring $= \frac{Q_{\text{maksdøgn}}}{2 \times I_{\text{klp.}} \times T_{\text{klp.}}}$ formel 4.8

- Asymptotisk oplandsbredde $= \frac{Q_{\text{tilladelse}}}{I_{\text{opland}} \times T_{\text{opland}}}$ formel 4.9

hvor,

$Q_{\text{maksdøgn}}$ = vandværkets maksimale døgnforbrug (m³/s);

$Q_{\text{tilladelse}}$ = vandværkets vandindvindingstilladelse (m³/s); dog min. 50.000 m³/år ifølge ovenstående.

$I_{\text{klp.}}$ = grundvandspejlets gradient ved kildepladsen;

I_{opland} = grundvandspejlets gradient i oplandet;

$T_{\text{klp.}}$ = grundvandsmagasinet's transmissivitet ved kildepladsen (m²/s);

T_{opland} = grundvandsmagasinet's transmissivitet i oplandet (m²/s).

Det maksimale døgnforbrug oplyses af vandværket. Hvis vandværket ikke ligger inde med oplysninger om det maksimale døgnforbrug anvendes følgende formel:

$$Q_{maksd\ddot{a}gn} = f_d^{\max} \times \frac{Q_{tilladelse}}{1,25} \quad \text{formel 4.10}$$

hvor $f_d^{\max}$ er døgnfaktoren, som vælges inden for intervallet 1,3 – 4,0. Vejledende værdier for maksimal døgnfaktor fremgår af tabel 4.2. De senere års fokus på vandsparende foranstaltninger, med opsætning af vandmålere, har gjort, at især forbrugere med et tidligere højt vandforbrug (maks-time og maks-døgn forbrugerne) er faldet markant. Det anbefales derfor, at døgnfaktoren vælges tæt på den laveste værdi vist i tabel 4.2.

Bebyggelsesmæssig karakter i forsyningsområdet	Døgnfaktor, $f_d^{\max}$
Fritidsområder (campingpladser, sommerhuse o. lign.)	2,0 – 4,0
Spredte eller samlede bebyggelser med overvejende landbrugserhverv	2,0 – 3,0
Mindre samlede bebyggelser med overvejende byerhverv	1,5 – 2,0
Større samlede bebyggelser med differentieret byerhverv	1,3 – 1,5

Tabel 4.2. Døgnfaktor for forskellige bebyggelsestyper som anvendes i formel 4.10 til bestemmelse af en indvindings maksimale døgnforbrug.

Anbefaling:

Det anbefales at bruge den tilladte indvinding $Q_{tilladelse}$, når oplande beregnes ud fra den analytiske metode, idet den er mere robust og fremtidssikret, og tager højde for eventuelle stigninger i indvindingsmængderne. Såfremt $Q_{tilladelse}$ ligger under 50.000 m³/år anbefales det, at runde op og benytte en Q på 50.000 m³/år, da der er større arealmæssig usikkerhed i optegning af analytiske oplande for meget små indvindinger.

Den asymptotiske bredde, som indvindingsoplandet vil nærme sig i stor afstand fra indvindingsboringen er principielt gældende ved grundvandsskellet. Af hensyn til at gøre beregningen af indvindingsoplandet operationel, er afstanden mellem indvindingsboringen og den asymptotiske oplandsbredde sat til samme længde som den asymptotiske oplandsbredde.

Anbefaling:

Det anbefales at afstanden mellem indvindingsboringen og den asymptotiske oplandsbredde sættes lig med den asymptotiske oplandsbredde.

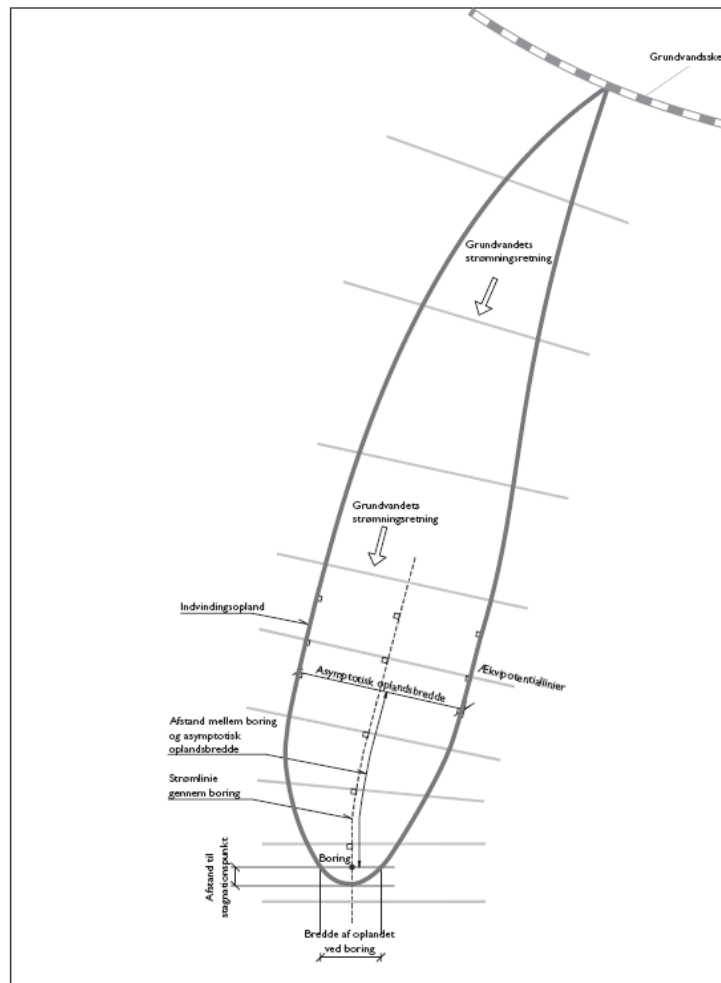


Fig. 4.3 Opland til vandværk med én indvindingsboring, hvor der indvindes fra et magasin med hældende grundvandsspejl.

Theis-metoden er en relativ stærk metode, dels fordi den er enkel at bruge, og dels fordi metoden bygger på magasinets hydrauliske egenskaber og øvrige hydrologiske forhold, som har stor betydning for indvindingsoplandets udseende. Som de fleste andre analytiske hydrogeologiske beregningsmetoder forudsættes det, at grundvandsmagasinet er homogent, isotropt og uendeligt udbredt. Metoden tager derfor umiddelbart ikke hensyn til, at de geologiske forhold kan variere inden for indvindingsoplandet. Indirekte kan metoden dog tage hensyn til geologien, da der kan anvendes forskellige værdier for T og grundvandsspejlets gradient ved beregning af stagnationspunktet, oplandsbredden ved indvindingsboringen og den asymptotiske oplandsbredde.

De parabelformede oplande skal, så vidt det er muligt, følge strømlinjerne bagud i oplandet til nærmeste grundvandsskel. Ud fra gradientforhold i magasinet skal oplandet forsøges optegnet vinkelret på ækvipotentialelinjerne. Eftersom ækvipotentialelinjerne ikke nødvendigvis ligger parallelle, kan oplandsbredden også ændres bagud i oplandet.

Anbefaling:

De parabelformede oplande bør så vidt muligt følge strømlinjerne bagud i oplandet, og dets siderne føres bagud til de naturligt mødes eller til de rammer et grundvandsskel. oplandsbredde.

4.1.2.2 Spændt magasin med lækage og frie magasiner

Formlerne i afsnit 4.1.2 kan principielt kun anvendes når grundvandmagasinet er spændt og uden lækage. I miljøstyrelsens vejledning (Miljøstyrelsen, 1995) vurderes det, at metoden tilnærmelsesvis også kan benyttes ved frie magasiner og magasiner med lækage. Den ekstra tilførsel af vand ovenfra vil dog betyde, at de reelle oplande ikke vil udbrede sig helt så meget, som de optegnede oplande angiver.

4.2 Indvindingsopland til en kildeplads med flere borer

Beregningen af et indvindingsopland til en kildeplads med kun en indvindingsboring er relativt simpel. Det bliver mere kompliceret, når der er flere indvindingsboringer på kildepladsen. Udgangspunktet for beregning af et indvindingsopland til en kildeplads med flere indvindingsboringer er, at hver indvindingsboring får optegnet sit eget "boringsopland". Boringsoplandene er afgørende for det samlede indvindingsoplands afgrænsning.

Oppumpningen fordeles ud på vandværksboringerne. Det vil være oplagt at kontakte vandværket for at få oplyst, hvordan indvindingen på årsbasis fordeler sig på boringerne. Alternativt kan indvindingstilladelsen eventuelt bidrage med oplysninger om de enkelte boreres kapacitet. En tredje mulighed er at fordele indvindingen ligeligt på indvindingsboringerne. Der beregnes herefter et boringsopland til hver af indvindingsboringerne på kildepladsen.

Anbefalinger:

For vandværker med flere borer anbefales det at optegne et "boringsopland" til den enkelte boring. Før indvindingen fordeles ud på boringerne anbefales det at kontakte vandværket for at få oplyst, hvordan indvindingen på årsbasis fordeler sig på boringerne.

4.2.1 Indvinding fra magasin med fladt vandspejl

Hvis en kildeplads indvinder fra flere borer i et område med fladt grundvandsspejl optegnes et boringsopland til hver af boringerne for derefter så med blød hånd at optegne et samlet indvindingsopland, der som en foreningsmængde indeholder borerens oplande. Hvis oplandene ligger langt fra hinanden, kan man vælge at præsentere indvindingsoplandet som separate boringsoplande. Hvis boringsoplandene lapper over hinanden, må det være op til personen der tegner oplandet, at vurdere, om en bufferzone skal lægges til for at kompensere for det overlappende areal. Det kan i den forbindelse

bemærkes, at indvindingsmængden, Q ikke umiddelbart indgår i beregningen af sænkningstragtens udbredelse ifølge ligningerne for fladt vandspejl formel 4.1 – 4.3.

4.2.2 Indvinding fra et magasin med gradient på grundvandspejlet

På tilsvarende måde, som ved fladt vandspejl, optegnes boringsoplandene for hver indvindingsboring på kildepladsen. Under det videre forløb med at fastlægge indvindingsoplandet vurderes det, om borings- oplandene overlapper hinanden.

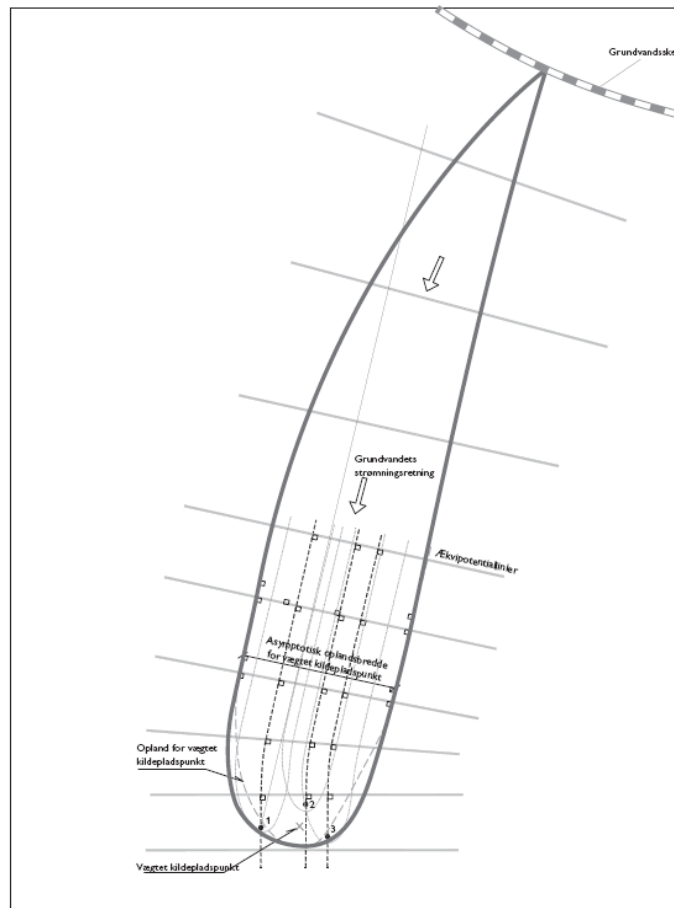
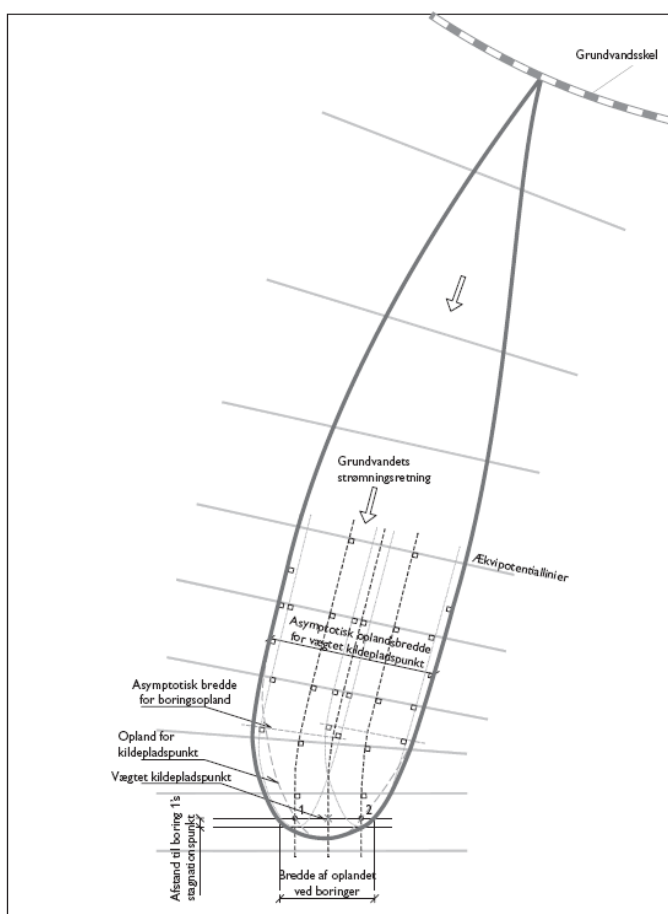
4.2.2.1 Hvis boringsoplandene lapper over hinanden

Hvis boringsoplandene lapper over hinanden udpeges et vægtet kildepladspunkt (jf. formler i appendiks 9.1A), og strømlinien gennem kildepladspunktet optegnes (jf. figur 4.4. og 4.5). Oplandsbredde og stagnationspunkt hørende til kildepladspunktet og beregnes med formlerne 4.7, 4.8 og 4.9 på baggrund af kildepladsens indvindingsmængde (henholdsvis $Q_{\text{maks. døgnsforbrug}}$ og Q_{tilladte}). Oplandsbredderne fordeles symmetrisk om strømlinien gennem kildepladspunktet. Afstanden fra det vægtede kildepladspunkt til den asymptotiske kildepladsoplandsbredde bestemmes tilsvarende, så den har samme længde som den asymptotiske kildepladsoplandsbredde.

Indvindingsoplandets afgrænsning forbindes gennem de stagnationspunkter som er beliggende længst nedstrøms, således at alle borings- og kildepladspunkts beregnede stagnationspunkter og alle oplandsbredder er indeholdt i indvindingsoplandet.

Anbefaling:

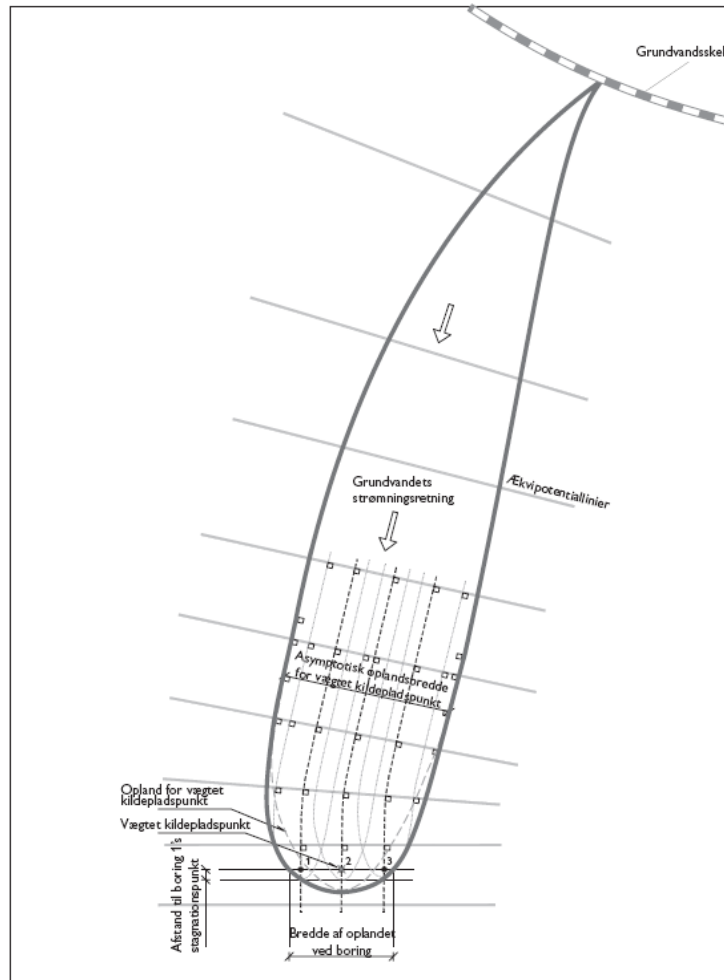
Det anbefales, at optegne indvindingsoplandet, så det omkranser alle borings- og kildepladspunkters beregnede stagnationspunkter og således indeholder alle oplandsbredder.



Figureerne 4.4 og 4.5 viser eksempler på optegning af indvindingsoplande, hvor der er overlap mellem borigsoplandene.

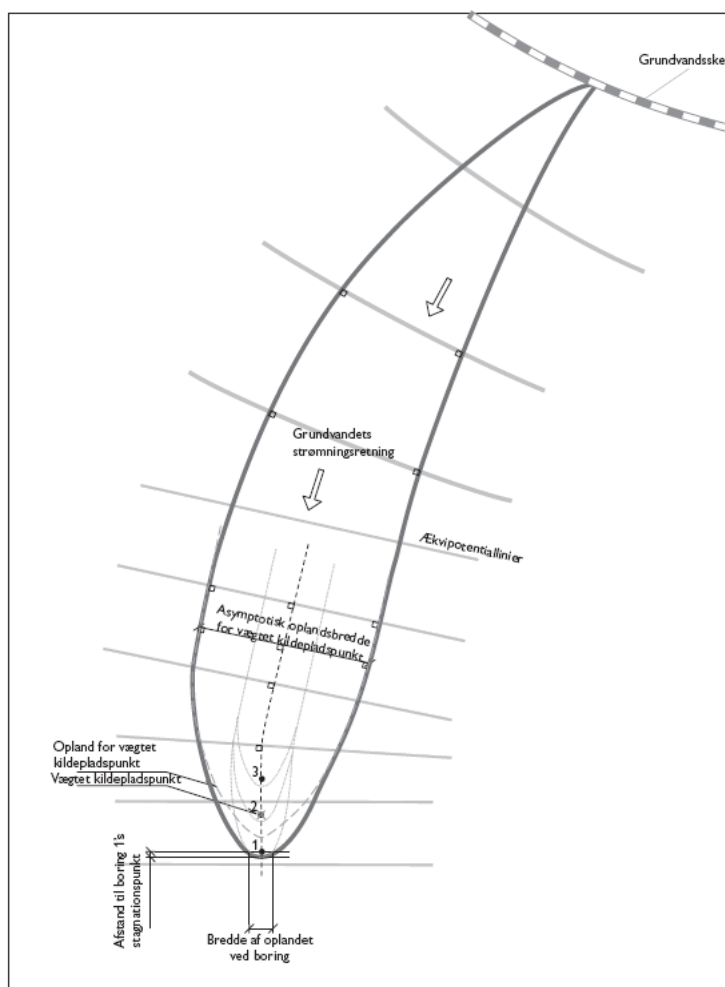
Boringerne er placeret symmetrisk ved siden af hinanden med samme grundvandskote, og indvindingen er fordelt jævnt på de to borer (jf. figur 4.4). Kildepladspunktet placeres imellem de to borer. Det er kildepladspunktets stagnationspunkt og asymptotiske oplandsbredde sammen med borigsoplandenes borigsnære oplandsbredder, der bliver afgørende for afgrænsningen af det endelige indvindingsopland.

Boringerne er placeret usymmetrisk med 3 borer der indvinder samme mængde (jf. figur 4.5). Kildepladspunktets koordinater kan bestemmes ud fra formler i appendiks 9.1A. Det er kildepladspunktets stagnationspunkt og asymptotiske oplandsbredde sammen med borigsoplandenes borigsnære oplandsbredder, der bliver afgørende for afgrænsningen af det endelige indvindingsopland.



Figur 4.6 Indvindingsopland til kildeplads med 3 symmetriske borer med samme grundvandskote.

Boringerne er placeret symmetrisk ved siden af hinanden med samme grundvandskote, og indvindingen er fordelt jævnt på de tre borer (jf. figur 4.6). Kildepladspunktet placeres oven i den midterste boring. Det er kildepladspunktets stagnationspunkt og asymptotiske oplandsbredde sammen med boringsoplandenes oplandsbredder, der bliver afgørende for afgrænsningen af det endelige indvindingsopland.



Figur 4.7 Indvindingsopland til kildeplads med 3 symmetriske borer på samme strømlinie.

Boringerne er placeret symmetrisk over hinanden med lige stor afstand på samme strømlinie (jf. figur 4.7). Indvindingen er fordelt jævnt på de tre borer. Kildepladspunktet placeres oven i den midterste boring. Det er den nedstrøms boringsstagnationspunkt og boringsnære oplandsbredde sammen med kildepladspunktets asymptotiske oplandsbredde, der bliver afgørende for afgrænsningen af det endelige indvindingsopland.

4.2.2.2 Hvis boringsoplandene ikke overlapper hinanden

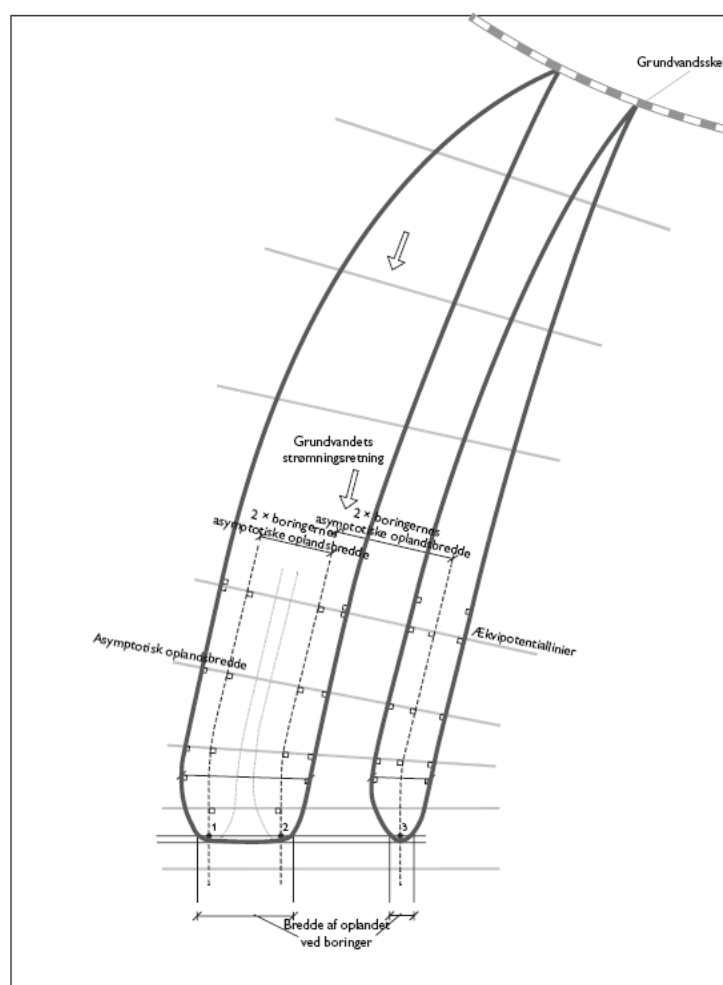
Hvis boringsoplandene ikke overlapper hinanden skelnes der mellem, hvor langt der er mellem strømlijerne gennem to indvindingsboringer som er beliggende tæt ved hinanden:

- Hvis afstanden mellem strømlijerne er mindre end summen af de to boringsoplandes asymptotiske oplandsbredder lægges boringsoplandene sammen til ét indvindingsopland.
- Hvis afstanden mellem strømlijerne er større end summen af boringsoplandenes asymptotiske oplandsbredder optegnes der særskilte indvindingsoplande.

Således kan en kildeplads repræsenteres med op til flere indvindingsoplande, hvis der er langt mellem indvindingsboringerne.

Anbefalinger:

Det anbefales at lade indvindingsoplandet optegne som to separate oplande til kildepladsen, hvis afstanden mellem strømlinierne gennem to naboboringer er større end summen af boringernes asymptotiske oplandsbredder.



Figur 4.8 Indvindingsoplande til en kildeplads uden overlap i boringsoplande.

Boringerne er placeret ved siden af hinanden med samme grundvandskote, og indvindingen er fordelt jævnt på de tre boringer (jf. figur 4.8). Eftersom der ikke er overlap mellem nogle af de tre boringsoplande optegnes der ikke et kildepladspunkt. Afstanden mellem de 2 nærmeste boringer er mindre end 2 gange deres asymptotiske oplandsbredder, hvilket betyder at oplandet tegnes som en foreningsmængde mellem de to oplande. Afstanden til den 3. boring er for stor, og derfor får den optegnet sit eget opland.

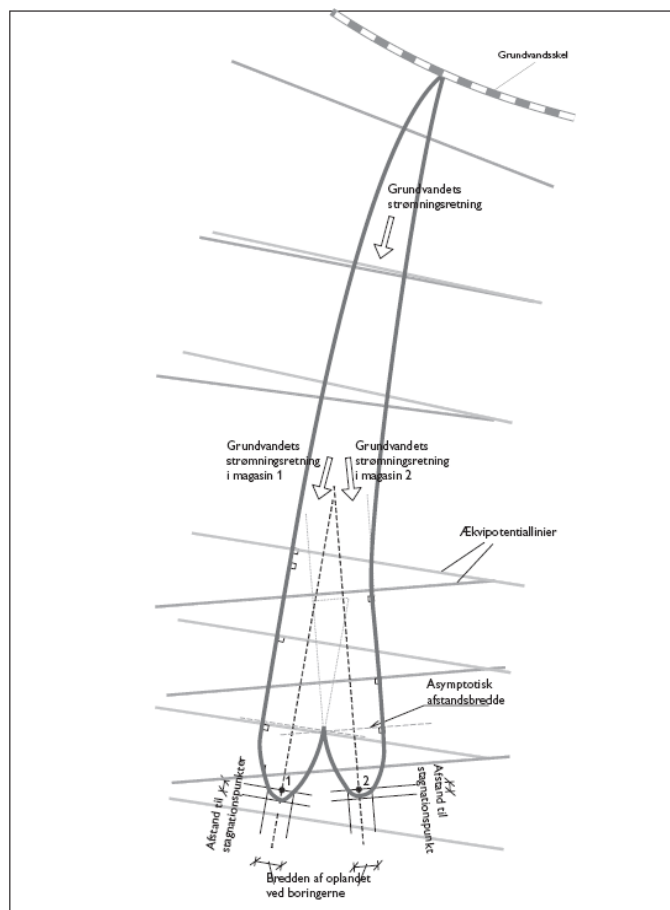
4.2.3 Indvinding fra flere grundvandsmagasiner

Der findes tilfælde, hvor indvindingen på en kildeplads sker fra forskellige adskilte grundvandsmagasiner (jf. figur 4.9). I sådanne tilfælde beregnes der særskilte indvindingsoplande for hvert grundvandsmagasin, der indvindes fra. Kildepladsens samlede indvindingsopland bestemmes herefter som indvindingsoplandenes foreningsmængde (Nordjyllands Amt, 2003).

I det omfang oplysninger om de to magasiners strømningsforhold og grundvandsparametre er til stede, bør de indgå i beregningerne. Det er dog ikke altid muligt at kortlægge præcise strømningsveje for begge magasiner, i så fald må oplandene følge strømlinjerne for det bedst kortlagte magasin.

Anbefaling:

Når der indvindes fra flere adskilte grundvandsmagasiner anbefales det at der beregnes særskilte indvindingsoplande for hvert grundvandsmagasin.



Figur 4.9 Indvindingsopland til vandværk, der indvinder fra to adskilte grundvandsmagasiner.

Eftersom der ikke indvindes fra samme magasin og borerne ikke umiddelbart påvirker hinanden, er der ikke belæg for at optegne et kildepladspunkt. Grundvandsstrømnin-

gen er lidt forskellig for de to magasiner. Oplandet optegnes som en foreningsmængde at de to boringsoplande (jf. figur 4.9).

4.3 Indbygning af usikkerheder i oplandsstørrelser – størst på små indvindinger

Som tidligere, er der en del usikkerheder forbundet ved at benytte simple formler til at afgrænse indvindingsoplande. Ikke mindst er datagrundlaget ofte mangelfuldt i trin 1 kortlægningen, der udføres på baggrund af eksisterende data. Miljøstyrelsens vejledning (Miljøstyrelsen, 1995) taler for at indbygge bufferzoner i oplandsafgrænsningen, så oplandsafgrænsningen bliver lidt mere robust og med større sandsynlighed dækker det virkelige indvindingsopland. Nærværende vejledning anvender i høj grad anbefalingerne fra Nordjyllands Amts vejledning (Nordjyllands Amt, 2003) der tolker oplandet noget større, end hvis det blev optegnet ud fra en ren gennemsnitsbetragtning.

Følgende forudsætninger og anbefalinger indarbejder usikkerheder i indvindingsoplandet så oplandet har større sikkerhed:

Fladt vandspejl

- Forudsætningerne om at der ikke sker infiltration inden for indvindingsoplandet af nedsivende grundvand til formel 4.1 holder ikke altid stik i virkeligheden. Ofte vil selve indvindingen efter en tid med tryktabsforplantning fra indvindingsboringen op til jordoverfladen være med til at øge infiltrationen i nærområdet omkring boringerne. Hvis oplandet tilføres vand fra oven, vil det begrænse sænkningstragtenes udbredelse og dermed oplandets størrelse i forhold til det beregnede.

Gradient på grundvandsspejl

- Formlerne for stagnationsafstande og oplandsbredder gælder, som i tilfældet med fladt vandspejl, principielt kun for det spændte magasin uden infiltration i oplandet. Formlerne anbefales alligevel brugt for såvel spændte som frie magasiner uanset infiltrationsforhold. Idet oplandsberegningerne ikke tager hensyn til infiltration vil oplandene blive optegnet lidt for store.
- Oplande der optegnes ud fra maksimale forventede indvindingssituationer som $Q_{\text{døgnmax}}$ og $Q_{\text{tilladelse}}$ frem for den gennemsnitlige indvindingssituation vil optegnes lidt større.
- Usikkerheden er forholdsvis størst for oplande til små indvindinger. Det er derfor hensigtsmæssigt at udarbejde en større sikkerhed i oplandet til de små vandvær-

ker og anbefaler derfor, at alle oplande til kildepladser med tilladelser under 50.000 m³/år, optegnes med en tilladelse på 50.000 m³/år.

- I tilfælde hvor der er flere muligheder for T- eller I-værdier, anbefales det at benytte et gennemsnit eller en lav værdi, hvilket også vil være med til at øge oplandsstørrelsen og dermed sikkerheden i oplandsudpegningen.
- Den asymptotiske oplandsbredde er bredere end den boringsnære oplandsbredde. Eftersom den asymptotiske oplandsbredde anbefales placeret nærmere indvindingsboringerne end der er teoretisk belæg for, vil det medføre lidt buffer i oplandsbredden i nærområdet omkring indvindingsboringerne i opstrøms retning.
- I tilfælde af en kildeplads med flere borer vil der ofte være områder mellem de enkelte boringsoplande, der indbefattes som buffer i det endelige opland. Specielt vil der blive inddraget et større areal nedstrøms borerne, idet stagnationspunkterne forbindes med en gennemgående linje.

4.4 AEM (Analytisk element metode)

Som det fremgår af kapitel 4 er det forbundet med store usikkerheder at konstruere analytiske oplande. Denne usikkerhed kræver særlig opmærksomhed hvor de oplande man afleverer til kommunerne er baseret på den analytiske beregningsmetode. I disse tilfælde, hvor man således ikke arbejder videre med numerisk modelberegnete oplande, er det derfor anbefalingen, at oplandsafgrænsningen i stedet baseres på en såkaldt alytisk element metode-AEM.

Hvad er AEM?

Der findes i dag flere analytiske element modeller på markedet, bl.a. MODAEM der indgår i GMS-modelpakken og Bluebird (Craig, J., 2002). Fælles for disse er, at de er enkle at bruge og slet ikke kræver de samme ressourcer som en traditionel numerisk grundvandsmodel.

AEM er typisk udviklet til at kunne beregne 2D-stationære grundvandsstrømninger. AEM er simpel at bruge, men inkluderer alligevel mange robuste værktøjer til design af grundvandsstrømning og oplandsbestemmelse. Modellerne kan også håndtere simple beskrivelser af søer og vandløb, nettonedbørszoner, forskelle i hydrauliske ledningsevner og porøsiteter, borer, forskelle i lagtykkelser og flux-baserede grænser.

Ved at anvende et analytisk modelværktøj i de tilfælde, hvor den analytiske beregning udgør grundlaget for de oplande, der skal optegnes og afleveres til kommunerne, vil kvaliteten af oplandene blive større. Denne kvalitet vil selvfølgelig blive endnu større såfremt AEM udvikles til at kunne inddrage flere lag.

Anbefaling:

Det anbefales, at såfremt de oplande der skal afleveres til kommunerne, er baseret på den analytiske metode beregnes der efter den analytisk element metode (AEM), både for indvindings- og det grundvandsdannende opland.

Der henvises i øvrigt til Hunt, R.J., 2006 for mere omkring AEM.

4.5 Kontrol af oplandsarealer og afgrænsning af oplandet

Hvis et vandværk hvert år skal kunne indvinde en vandmængde svarende til deres tilladelse, må der nødvendigvis inden for oplandet dannes mindst lige så meget vand som der indvindes. Hvis en indvinding er placeret langt fra grundvandsskel, vil der ofte være et stort opland at trække grundvandet fra. Omvendt er der fare for, at oplandet optegnes for lille, hvis det ligger meget tæt på grundvandsskel. Det anbefales, at oplandsoptegningen altid tjekkes med en simpel arealbetragtning i henhold til formel 4.11 (Miljøstyrelsen, 1995).

$$A \geq \frac{Q_{\text{Tilladelse}}}{N \times 1000} \text{ (km}^2\text{)} \quad \text{Formel 4.11}$$

Hvor $Q_{\text{Tilladelse}}$ er vandværkets indvindingstilladelse i m³/år og N er grundvandsdannelsen, der tilføres magasinet ovenfra i mm/år.

Grundvandsdannelsen kan ikke direkte måles, men kan skønnes.

Hvis arealtjekket finder det optegnede opland for lille, bør oplandet justeres på bedste måde, indtil det har opnået det ønskede areal. Det er specielt oplande beliggende tæt på vandsskel der kan have behov for at blive arealkorrigeret.

5. Den numeriske metode

Resumé

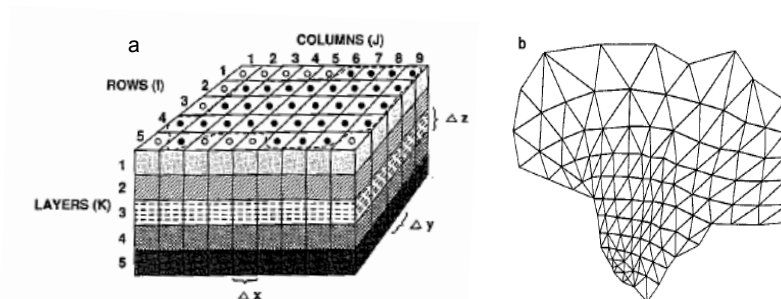
I dette kapitel beskrives, hvad en numerisk grundvandsmodel er, og hvilke krav der skal være opfyldt for, på bedste vis, at kunne anvende den numeriske metode sammen med partikelbaneberegninger, til bestemmelse af oplande og kvantificering af disse. Til slut vil der blive givet et bud på, hvilke data, figurer og korttemaer, der er relevante at udarbejde i forbindelse med udpegningen af oplandene.

5.1 Hvad er en numerisk model

Grundvandsstrømning og stoftransport i grundvand kan matematisk beskrives ved partielle differentialligninger, der skal løses for at beregne trykniveauer og stofkoncentrationer i grundvandet. En numerisk model er en model, hvor man formulerer en numerisk tilnærmelse til de styrende ligninger. Tilnærmelsen fremkommer ved, at man inddeler det betragtede område i et endeligt antal elementer (Bear J., 1979). Den mest anvendte numeriske metode er finite-difference-metoden, der er et særtilfælde af finite-element-metoden (Anderson, MP. & Woessner W.W., 1992). For finite-difference-metoden gælder, at elementerne har kasseform, mens elementerne for finite-element-metoden kan have mange forskellige former, typisk med trekantede sideflader. Metoden er mere beregningstung og mere krævende i forbindelse med generering af højdemodeller, som skal indlæses i det irregulære finite-elemente-grid og derfor er metoden generelt mere arbejdskrævende.

Valget af numerisk metode afhænger af problemstillingen og til dels også af brugerens præferencer (Anderson, MP. & Woessner W.W., 1992). Programmerne GMS, GW-Vistas, Visual MODFLOW og MIKE SHE, der alle bruger MODFLOW-koden, kører med finite-difference, hvorimod FEFLOW og WATFLOW kører med finite-element opbygningen.

I gennemgangen af amternes brug af forskellige modelværktøjer, er der oftest blevet opstillet modeller efter finite-difference-metoden. I forbindelse med bestemmelse af oplande til boringer, der indvinder grundvand, vurderes de to numeriske metoder umiddelbart at være lige anvendelige. Fordele og ulemper ved de to metoder vil kort blive beskrevet i afsnit 5.3.1.



Figur 5.1 Regulært finite-difference-grid (a) og irregulært finite-element-grid for Nil-deltaet (b). (Kilde: Anderson, MP. & Woessner W.W., 1992).

5.2 Krav til den geologiske model

For at en numerisk model er god og troværdig kræves det, at der er indsamlet og kortlagt tilstrækkeligt med geologisk viden, så der på denne baggrund kan opstilles en veldokumenteret geologisk model.

Anbefaling:

Der er udarbejdet en Geo-vejledning i opstilling af geologiske modeller, og det anbefales, at den geologiske og hydrostratigrafiske model opstilles efter denne vejledning (Jørgensen, et. al., 2008).

Derfor er alle detaljer ikke angivet her. Nedenfor er kort beskrevet, hvilke datatyper og parametre det er vigtigt at have styr på, inden man opstiller modellerne.

Grundvandsmagasinerne rumlige udbredelse og afgrænsning er vigtige at have styr på i forhold til grundvandsmodellens randbetingelser, som kan være afgrænset af impermeable ler- eller siltlag. Informationer om disse forhold kan tilvejebringes gennem borer og TEM-sonderinger, der som bekendt er gode til at opløse de geologiske lag i større dybder, hvor der forekommer en god leder bestående af f.eks. fed ler i bunden af den kortlagte lagflade. I områder, hvor der optræder mægtige sandlag større end 200 meter, og hvor der ikke umiddelbart findes en god leder i bunden af laget, kan seismik kombineret med informationer fra borer være en bedre løsning.

Endvidere er det meget vigtigt, at man lokalt kender til forekomsten af dæklag og evt. geologiske vinduer i de øverste lag, da disse er meget styrende for hvor nedsivningen og dermed grundvandsdannelsen foregår. Det er derfor en god idé at kortlægge de øvre lag med slæ-

begeoelektrik som f.eks. PACES eller MEP i de områder, der forventes at udgøre det grundvandsdannende opland til den pågældende kildeplads. For PACES er en dækning på 4 km/km² en passende detaljeringsgrad (Miljøstyrelsen, 2000).

De indsamlede data sammenstilles i et geologisk tolkningsværktøj, hvor der i detailkortlægningsområder lægges profilsnit ind med en indbyrdes afstand på maksimalt 500 meter imellem hver profillinie. Man vil herved få mulighed for at opløse selv små strukturer i overfladen, som geologiske vinduer og lerlinser, som kan være styrende for nedsivningen og dermed vandets vej fra overfladen og ned til indvindingsboringen.

Endelig er det vigtigt, at den geologiske og den numeriske grundvandsmodel ikke har en diskretisering som er større end 100*100 meter, da en større diskretisering på beregningscellerne vil kunne bidrage til betydelige fejl i de beregnede oplande.

Anbefaling:

Det anbefales at profiler, som skal danne grundlag for den geologiske model maksimalt må have en indbyrdes afstand på 500 meter imellem hver profillinie. Endvidere anbefales det, at der arbejdes med en gennemgående diskretisering på 100*100 meter grids i den geologiske og i den numeriske grundvandsmodel.

5.3 Krav til den numeriske model

Den numeriske model opstilles og kalibreres efter de kriterier, som er angivet i "*Håndbog i Grundvandsmodellering*" (Sonnenborg, T.O. & Henriksen H. J., 2005), men i det følgende ridser der kort op, hvad man særligt skal være opmærksom på i forbindelse med opsætning og kalibrering af numeriske modeller, der skal anvendes til at bestemme indvindings- og grundvandsdannende oplande.

Anbefaling:

Der er udarbejdet en håndbog af GEUS i opstilling numeriske grundvandsmodeller, og det anbefales, at den numeriske model opstilles efter denne håndbog.

5.3.1 Grids: finite-difference vs. finite-element

Som nævnt i forrige afsnit anbefales det, at der arbejdes med 100*100 meter grid som model cellestørrelse, og evt. en finere inddeling på 50 eller 25 meter inde omkring kildepladsboringer. Det er specielt en fordel at arbejde med små cellestørrelser, når der er tale om små kildepladser med en lille indvinding, hvor påvirkningstragten omkring boringen er beskeden.

Her vil et opland blive bestemt med en meget større præcision, når der arbejdes med mindre celledimensioner, (Zheng, C., 1992).

Skal man foretage en fininddeling af sine modelceller inde omkring kildepladsen, er finite-element-løsningen god, da man undgår at fininddele unødigt mange celler, som det er tilfældet ved finite-difference-metoden. Omvendt er det meget lettere at producere højdemodeller i div. kontureringsprogrammer til finite-difference-grids, end det er for finite-element-grids. Finite-element-metoden er mere beregningstung og mere krævende i forbindelse med generering af højdemodeller, som skal indlæses i det irregulære grid.

5.3.2 Potentialeforhold

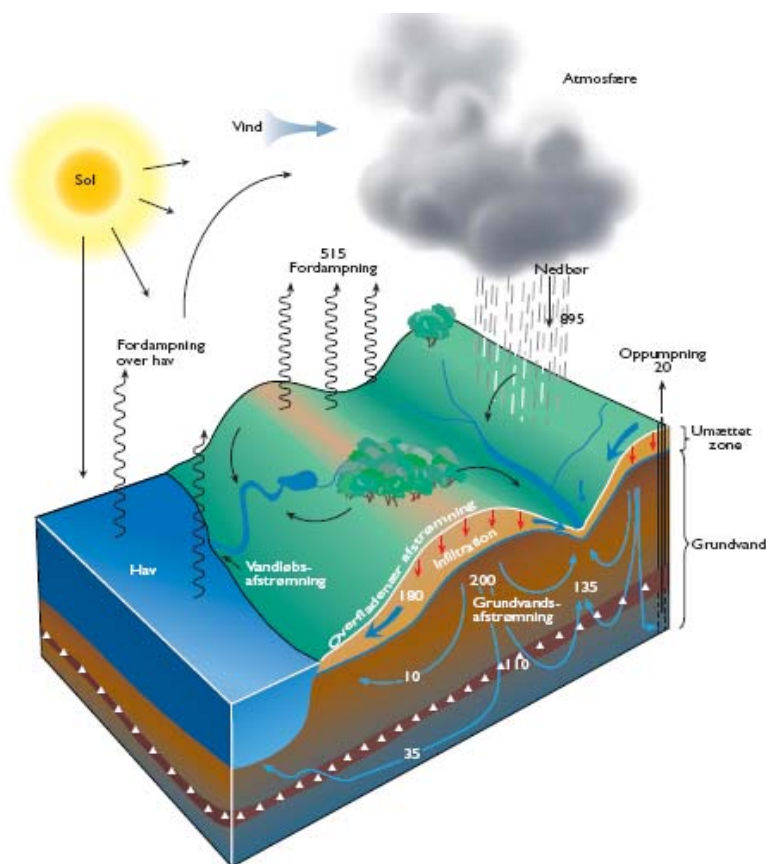
Det er vigtigt, at der findes tilstrækkeligt med pejleboringer i oplandet til den aktuelle kildeplads, så der kan optegnes et pålideligt potentialekort så strømningsbilledet er så velbeskrevet som muligt. Dette gælder for alle relevante magasiner inden for nærområdet til kildepladsen. De største fejl i forbindelse med bestemmelse og fastlæggelse af indvindings- og grundvandsdannende oplande skyldes ofte en forkert opfattelse af grundvandets strømningsforhold i nærområdet til kildepladserne.

Det er især vigtigt, at de kalibrerede trykniveauer i fokusområderne omkring de aktuelle kildepladser stemmer godt overens med de observerede. Der kan accepteres en fejlmargen på de kalibrerede mod de observerede potentialer på mellem $\pm 1-3$ meter inden for det forventede opland.

5.3.3 Bestemmelse og kalibrering af hydrauliske parametre

Erfaringer har vist, at en nøjagtig bestemmelse af de hydrauliske parametre som transmissiviteten T (m^2/s) eller den hydrauliske ledningsevne K_x , K_z (m/s) i de magasiner der indvindes fra, er den vigtigste faktor, når man skal beregne et indvindingsopland korrekt, Bhatt K. (1993).

Når der indlægges hydrauliske zoner i den numeriske model som K eller T -værdier, skal man være opmærksom på ikke at indarbejde for store kontraster imellem de zonerede K eller T -værdier. Hvis der forekommer spring i de hydrauliske parametre på f.eks. 3 og 4 størrelsesordner, kan det blive meget styrende og direkte være skyld i numeriske fejl i de efterfølgende partikelbaneberegninger.



Figur 5.2 Vigtige elementer i vandbalancen at holde styr på i forbindelse med udarbejdelse af grundvandsdannende oplande (efter. Refsgaard, J.C. et. al., 2003).

5.3.4 Vandbalance

Det er vigtigt, at vandbalancen er bestemt korrekt, både overordnet i den numeriske model, men også på oplandsniveau i forhold til den konkrete indvinding på hver enkelt kildeplads (jf. 5.3.5).

Den overordnede vandbalance er i særlig grad afhængig af en troværdig bestemmelse af **nettonedbøren**, der findes ud fra observationer af nedbøren minus den aktuelle fordampning.

Middel- og medianminimumsværdier bestemt ud fra observationer fra hydrometri-stationer er ligeledes vigtige elementer i vandbalancen, der også særligt skal lægges vægt på i detailområderne.

Endelig er størrelsen af den **oppumpede vandmængde** i området vigtig at holde styr på i vandbalancen, da oplandets størrelse som bekendt er direkte proportionalt med indvindings størrelse.

For at kunne bestemme det grundvandsdannende opland på den mest optimale måde er det vigtigt, at vandbalancen for det enkelte opland er korrekt og bestemt med mindst mulig usikkerhed. Der skal således være overensstemmelse mellem det vand der pumpes op af boringen, og den mængde vand som siver ned i jorden på det pågældende areal, der betegnes som det grundvandsdannende opland.

Anbefaling:

Det anbefales, at der i forbindelse med modelberegnete grundvandsdannende oplande er stor fokus på vandbalancen inden for det enkelte opland.

5.3.5 Parametre som er styrende for beregningen af oplandet

I beregninger af oplande, vha. den numeriske model, til indvindingsboringer indgår en række parametre, blandt andet nettonedbør, indvinding, porøsitet og anisotropi. Ved hjælp af numeriske metoder er det muligt og relativt hurtigt at belyse effekten af forventede variationer i disse parametre på oplandsbestemmelsen.

Nettonedbørens størrelse og fordeling er væsentlig at kortlægge og implementere i grundvandsmodellen som grundlag for beregning af den arealdistribuerede grundvandsdannelse til de vandførende lag. Oplandets størrelse er omvendt proportional med grundvandsdannelsens størrelse og er derfor en meget vigtig parameter i forbindelse med bestemmelse af oplande.

Anbefaling:

Det anbefales, at man udfører forskellige modelscenarier, hvor man varierer på infiltrationen i forhold til den gennemsnitlige infiltration. Et bud på relevante scenarier kan være, at man udfører 2 scenarier med henholdsvis ± 25 % af den gennemsnitlige infiltration, og på denne baggrund vurderer usikkerheden på oplandets udbredelse.

Indvindingens størrelse og fordeling er også vigtig at kortlægge og implementere i den numeriske grundvandsmodel, da oplandets størrelse er direkte proportionalt med indvindingens størrelse. Oplandet til en given indvindingsboring kan samtidig også være afhængig af indvindingen i andre indvindingsboringer som grænser op hertil.

Der kan være stor forskel på, om der i en model er kørt med den faktiske eller den tilladte indvundne vandmængde ($\text{m}^3/\text{år}$), som typisk er større end den faktiske indvinding.

Anbefaling:

Det anbefales, at der i forbindelse med kalibrering af stationære modeller køres med den tilladte indvundne vandmængde Q_{tilladte} , hvor man beregner et gennemsnit over den Q_{tilladte} over de seneste 3-5 år. Denne indvinding betegnes som reference indvindingen. Det anbefales, at der ud over referenceindvindingen (scenarie 1) køres et (scenarie 2), hvor man anvender den faktiske indvundne vandmængde ($\text{m}^3/\text{år}$) samtidig med, at der køres et (scenarie 3), hvor man giver et bedste bud på den fremtidige indvinding, for herved at gøre sine oplandsberegninger mere robuste i forhold til fremtidige ændringer i indvindingsmængden.

Effektive porøsitet. En kortlægning af den effektive porøsitet og implementering af denne i den numeriske grundvandsmodel er afgørende, hvis en korrekt bestemmelse af transporttider og alder af grundvandet skal udføres. Det er dog sjældent muligt i praksis at kortlægge den effektive porøsitet for alle relevante lag, og derfor anvendes der oftest empiriske tal for denne parameter. For sandmagasiner anvendes ofte værdier på mellem 0,2 – 0,3 og for dæk- og lækagelag anvendes ofte værdier på mellem 0,05 - 0,1, (Henriksen H.J. et. al., 2000).

Anisotropi. Der kan forekomme retningsbestemte variationer i den hydrauliske ledningsevne, der også betegnes som anisotropi. Implementering af anisotropi i grundvandsmodeller kan også være væsentligt. For lagdelte bjergarter er den horisontale hydrauliske ledningsevne typisk større end den vertikale hydrauliske ledningsevne. Kortlægning af anisotropien er væsentlig for at kunne give en præcis beskrivelse af grundvandets strømningsveje. Endvidere kan der forekomme anisotropi i opsprækkede bjergarter som det f.eks. kan være tilfældet i kalkbjergarter. Her kan der forekomme såkaldt "præferentielle" strømninger, hvor den overvejende del af strømningen foregår i store sprækkesystemer, og således er med til at komplicere det lokale strømningsbillede i området. Sprækkestrømninger kan være så dominerende, at strømningen kan foregå vinkelret på den forventede strømningsretning, og således gøre det yderst vanskeligt at opstille pålidelige modeller i disse områder og dermed beregne et troværdigt opland.

5.3.6 Stationære vs. dynamiske modeller

Partikelbaneberegninger kan udføres både ud fra stationære og dynamiske modeller.

Anbefaling:

Det anbefales generelt, at der anvendes dynamiske modeller, hvis data tillader det. Foreligger der lange pejle- og vandføringstidsserier, er det muligt at opstille en dynamisk model, der udnytter de observerede data bedst muligt og således giver mulighed for en grundigere og mere sikker kalibrering i forhold til en stationær model.

Hvis der derimod ikke foreligger tilstrækkelig med data, er det også tilstrækkeligt at opstille en stationær model til udførelse af partikelbaneberegninger, men det anbefales, at der efterprøves med forskellige infiltrationsværdier i forbindelse med scenarie-usikkerhedsvurderinger.

Der er visse problemer forbundet med bestemmelse af indvindings- og grundvandsdannende oplande ud fra dynamiske modeller. Vandbalancen er ofte svær at få til at stemme på det grundvandsdannende opland.

5.4 Partikelbanesimuleringer

Amterne har traditionelt anvendt grundvandsmodelværktøjerne MODFLOW og MIKE SHE, og partikelbanesimuleringerne er oftest udført i de tilhørende partikelbaneprogrammer MODPATH og i MIKE SHE's partikelbanemodul.

5.4.1 MODPATH partikelbanemodul

Partikelbanemodulet MODPATH som tilhører MODFLOW systemet kan opstilles for enten stationær eller dynamisk strømning. Modulet beregner partikelbaner på baggrund af hastighedsvektoren for ethvert punkt i strømningsfeltet, baseret på flow rater mellem de enkelte beregningsknudepunkter fra strømningsmodellen.

Der benyttes simpel lineær interpolation til at beregne hastighedskomponenterne for punkter inden for hvert enkelt modelgrid. Da der ikke benyttes en random walk metode, er der i MODPATH tale om en ren advektiv partikeltransport, uden dispersivitet.

På grund af denne relativt simple løsning er det også muligt både at beregne partikelbaner i nedstrøms og opstrøms retning. MODPATH har således særlige faciliteter til initial placering af partikler på en cirkelbue i en bestemt afstand fra f.eks. en indvindingsboring i forbindelse med opstrøms partikelbanesimulering, og placering af partikler på en linie ved nedstrøms simulering.

MODPATH kan vise resultaterne i plan afbildning og projiceret ind på et tværprofil. Det er ikke muligt at vise resultaterne på gridniveau (Henriksen, J.H. et al., 2000).

5.4.2 MIKE-SHE partikelbanemodul

MIKE SHE partikelbanemodul er en del af det stoftransportmodul der hører til modelsystemet. Partikelbanemodul kan anvendes til afgrænsning af infiltrationsområder og indvindingsoplande til indvindingsboringer eller grundvandsmagasiner.

For hvert beregningslag i modellen kan oplande til vandindvindinger bestemmes med modellen, således at såvel det samlede indvindingsopland, infiltrationsområdet samt indvindingsoplandet til det filtersatte magasin (IDFM) kan bestemmes. Systemet holder styr på antallet af partikler, der indgår i en simulering, deres oprindelseskoordinater såvel som hvilke partikler der havner i indvindingsboringerne.

MIKE SHEs partikelbanemodul foretager en beregning, som er analog til advektions-dispersionsligningen, idet der anvendes en random walk metodik. Et stort antal partikler flyttes ved simuleringen individuelt i et antal tidsstep på baggrund af bidraget fra såvel advektiv som dispersiv transport. Til hver partikel er tilknyttet en partikelmasse, hvilket betyder, at lokaliseringen af et antal partikler i et specifikt volumen (her defineret ved det numeriske grid som benyttes for vandstrømningsberegningerne) svarer til en koncentration (af et opløst stof i grundvandet - DHI, 1997). Forud for afvikling af partikelbanemodul må den tre dimensionale grundvandsstrømning beregnes ved hjælp af MIKE SHEs grundvandsmodel (MIKE SHE WM).

Partikelbanemodul kan foretage simuleringer på grundlag af enten stationær eller dynamisk strømningssimulering for grundvandskomponenten (SZ). Der er mulighed for at foretage partikelsimuleringer for en længere periode ved at 'recykle' simuleringresultatet fra strømningsmodellen.

Den initiale placering af "opsamlingsboringer" fastlægges i en ekstern fil enten som koordinater til indvindingsboringerne, der ønskes medtaget i analysen eller som gridkoordinater til f.eks. indvindingsboringer eller f.eks. monitoringsboringer, for hvilke oprindelseskoordinater, transporttider mv. ønskes bestemt.

MIKE SHE kan vise resultater på såvel gridniveau som ved partikelkoordinater. Der er dog ikke mulighed for at vise et tværprofil af simulerede partikelbaner (Henriksen, J. et al., 2000).

5.4.3 Partikelbanesimuleringer, forlæns og baglæns modelkørsler

Det er ikke helt ligegyldigt om partikelbanerne regnes forlæns eller baglæns i forbindelse med oplandsberegninger. Traditionelt har man ofte udført baglæns simuleringer, da de oftest er hurtigere og mere simple at udføre. Man skal dog være påpasselig med udelukkende at udføre baglæns simuleringer, da metoden har sine svagheder. I de fleste partikelbanemoduler er der mulighed for at placere partikler på flere forskellige måder i indvindingsfilteret, og den rumlige fordeling kan have stor betydning for, hvor partiklerne finder op til overfladen. Hvis f.eks. partikler placeres i et modellag med et 10 meter langt filter med partikler i henholdsvis top, mellem og bund med 5 meter imellem hvert lag af partikler, vil disse sandsyn-

ligvis, når de regnes baglæns, samle sig i 3 klynger på overfladen og således ikke udpege et homogent og sammenhængende opland.

Dette problem kan imidlertid løses på flere måder. En metode, som er rimelig overskuelig og let at anvende, er ved at man blot placerer et fast antal partikler i toppen af hver celle i det aktive modellag (jf. anbefaling nedenfor). Herefter regnes forlæns ned til den pågældende boring. De partikler, som finder vej ned til indvindingsfilteret, udgør således det grundvandsdannende opland.

MIKE SHE's partikelbanemodul kan ikke udføre baglæns partikelbaneberegninger. Derfor placeres partiklerne altid i det øverste aktive lag eller i det aktuelle magasin, hvor der indvindes fra i den numeriske grundvandsmodel. I programmet lægger man typisk f.eks. 10-20 partikler i hver celle i indvindingsmagasinet og finder så ud af, hvor mange partikler der når hen til indvindingsfilteret, og man finder herved indvindingsoplandet til den pågældende kildeplads. Når man efterfølgende skal fastlægge det grundvandsdannende opland, placerer man typisk mange partikler (f.eks. 25 partikler) i hver celle i det øverste modellag, og finder ud af, hvor mange partikler der finder vej ned til indvindingsfilteret.

Anbefaling:

Det anbefales at der i forbindelse med beregning af det **grundvandsdannende opland** placeres minimum 4 og maksimalt 25 partikler i hver modelcelle i det øverste aktive modellag, hvor der foregår en grundvandsstrømning. Disse partikler fordeles jævnt ud i toppen af det øverste aktive modellag over et område, der er en del større end det forventede opland. Partiklerne fra overfladen beregnes forward ned til det pågældende indvindingsfilter og de partikler som finder vej til indvindingsfilteret udgør det grundvandsdannende opland.

Valg af tidsskridtlængde på partikelbaneberegningerne har stor betydning i forhold til, hvor godt den generelle strømningsvej bestemmes. Generelt må det anbefales at der vælges så små tidsskridt som muligt.

5.4.4 Håndtering af den umættede zone:

De fleste numeriske grundvandsmodeller modellerer som bekendt kun den mættede zone, med mindre der er koblet et overflademodul sammen med modellen. Når man udfører partikelbaneberegninger er partiklernes transporttid i den umættede zone altså ikke medregnet. På grund af dette forhold, og de øvrige usikkerheder, der er forbundet ved partikelbaneberegninger, anbefales det at anvende partiklernes relative alder frem for den eksakte alder, med mindre transporttiden i den umættede zone lægges til transporttiden i den mættede zone. Men her er det vigtigt, at der i denne forbindelse klart redegøres for usikkerhederne for transporttiden i både den mættede og den umættede zone.

5.4.5 Usikkerheder, stokastiske oplande

Da en numerisk grundvandsmodel er baseret på et endeligt antal oplysninger, vil der i praksis ikke kun være én løsning på de styrende ligninger, men flere løsninger, der i princippet er lige sandsynlige. Det er derfor relevant i forbindelse med oplandsbestemmelsen at fokusere på resultaterne af den følsomhedsanalyse, der bør foretages i forbindelse med kalibreringen af grundvandsmodellen.

Anbefaling:

Det kan generelt anbefales, at der foretages en invers kalibrering, dvs. bestemmelse af de følsomme parametre ved ikke-lineær regression, da usikkerheden på parametrene fås som et produkt heraf. Det er en forudsætning for, at man kan anvende usikkerhederne på de estimerede parametre, eksempelvis angivet ved 95 % konfidensintervaller, at residualerne (forskellene mellem de målte og de simulerede værdier) varierer tilfældigt i både tid og rum og at de er normalfordelte (Christensen, S., 1998).

Såfremt forudsætningerne er opfyldt, kan de fundne usikkerheder herefter danne grundlag for en stokastisk analyse, hvor effekten af parameterusikkerheden kvantificeres.

Anbefaling:

Det anbefales, at der som standard i forbindelse med oplands- og scenariereberegninger udføres stokastiske oplandsberegninger.

Den stokastiske analyse kan eksempelvis foregå ved en udvælgelse af et antal lige sandsynlige kombinationer af værdier for de følsomme parametre, som der efterfølgende beregnes løsninger ud fra med grundvandsmodellen. Udfaldsrummet af de forskellige løsninger, beregnet med grundvandsmodellen, vil belyse den usikkerhed på løsningen af strømningsligningen, der skyldes usikkerheden på parametrene. For hver sandsynlig løsning kan der efterfølgende beregnes oplande vha. en partikelbanemodel, og udfaldsrummet af oplande for de sandsynlige løsninger vil således belyse den usikkerhed på oplandene, der skyldes usikkerheden på parametrene.

Eksempel

Der er med en grundvandsmodel bestemt et grundvandsdannende opland ud fra 100 lige sandsynlige og realistiske kombinationer af værdier for parametrene. For en given modelcelle inden for oplandet kan man tælle antallet af gange modelcellen indgår i en af de 100 realisationer af oplandet. Hvis modelcellen for eksempel indgår i oplandet i 80 ud af de 100 realisationer, kan man argumentere for, at der er stor sandsynlighed for, at modelcellen indgår i det sande grundvandsdannende opland (jf. 5.5.4 for mere omkring den stokastiske metode).

Scenarieusikkerhed

Som grundlag for indsatsplanlægningen er det nødvendigt, at de kortlagte oplande har en vis robusthed overfor de forventede fremtidige ændringer i indvindingsstrukturen og klimaændringer med indflydelse på nettonedbørens størrelse og fordeling. Det anbefales derfor, at der foretages scenariekørsler, der tager højde for forventede ændringer i indvindingsstrukturen, inklusive den situation, hvor vandværkerne udnytter hele deres tilladelse.

Det er vigtigt at have for øje, at partikelbaner ændrer sig som følge af nye påvirkninger på systemet, selv om disse påtvinges på andre lokaliteter end omkring den boring, hvorpå der udføres oplandsberegninger. Enhver beregning, som har til formål at bestemme infiltrationsområder, må vurdere partikelbaner for hele systemet i stedet for blot at analysere infiltrationsområdet til en enkelt boring. Så snart der tilføjes ændrede indvindingsforhold, må vurderingen af infiltrationsområder og indvindingsoplande derfor genberegnes på ny (Reilly et al., 1993).

Mht. nettonedbøren og dens betydning for oplandenes udbredelse anbefales det som nævnt i afsnit 5.3.5, at man forsøger at køre forskellige scenariekørsler, hvor man ændrer i nettonedbøren for at tage højde for evt. ændringer i de klimatiske forhold.

Udfaldsrummet for oplandene bestemt ved de forskellige scenarier, kan sammen med usikkerheden på oplandene, der skyldes usikkerheden på parametrene, indgå i belysningen af den samlede usikkerhed på oplandsbestemmelsen.

5.4.6 Begrænsninger ved partikelbaneberegninger

MIKE SHE og MODFLOW's partikelbanemoduler er begrænset af følgende grundlæggende antagelser i partikelbanesimuleringerne:

- Advektiv/konservativ strømning,
- Diskretiseringseffekter – valg af den rigtige cellestørrelse,
- Usikkerheder i parametre og randbetingelser.

Hvor præcist de beregnede partikelbaner er udført og en videre korrekt tolkning af disse, afhænger af hvor godt det hydrogeologiske system kan beskrives og opløses af de definerede gridceller i den numeriske model. Graden af en rummelig 3D diskretisering i en finite - difference model har indflydelse på :

- Detaljeringsniveauet med hvilken det hydrogeologiske system og randbetingelser til dette kan beskrives
- Nøjagtigheden af strømningshastighedsberegningerne
- Evnen til så præcist som muligt at repræsentere interne "sinks" (indvindingsboringer eller vandløbsceller).

Betydningen af rumlig diskretisering for repræsentationen af vandindvindinger er særlig vigtig i forbindelse med partikelbanesimuleringer på grund af følsomheden, som er knyttet til simuleringen af partikelflytninger i gridceller, som udgør en 'svag' sink/vandindvinding. Disse celler indeholder oppumpninger eller f.eks. vandløbsgrids, hvor oppumpningsraten/udstrømningen til vandløb ikke er stor nok til, at de kan forbruge alt det vand, der strømmer til griddet. Nettoresultatet er en sinkcelle, som har udstrømning gennem en eller flere af cellens rande. For sådanne sinks er det vanskeligt at vurdere, hvorvidt partikler havner i indvindingsboringen/vandløbet, eller strømmer ud af cellen.

Dette problem er direkte forbundet med en for grov rumlig diskretisering. Ved anvendelse af et mere forfinet beregningsnet kan problemet søges elimineret, idet "svage" sinks herved kan ændres til "stærke" sinks, hvor hele vandstrømningen til cellen ender i f.eks. indvindingsboringen (Henriksen, J. et al., 2000).

5.5 Layout og figurer, hvordan præsenteres oplandene

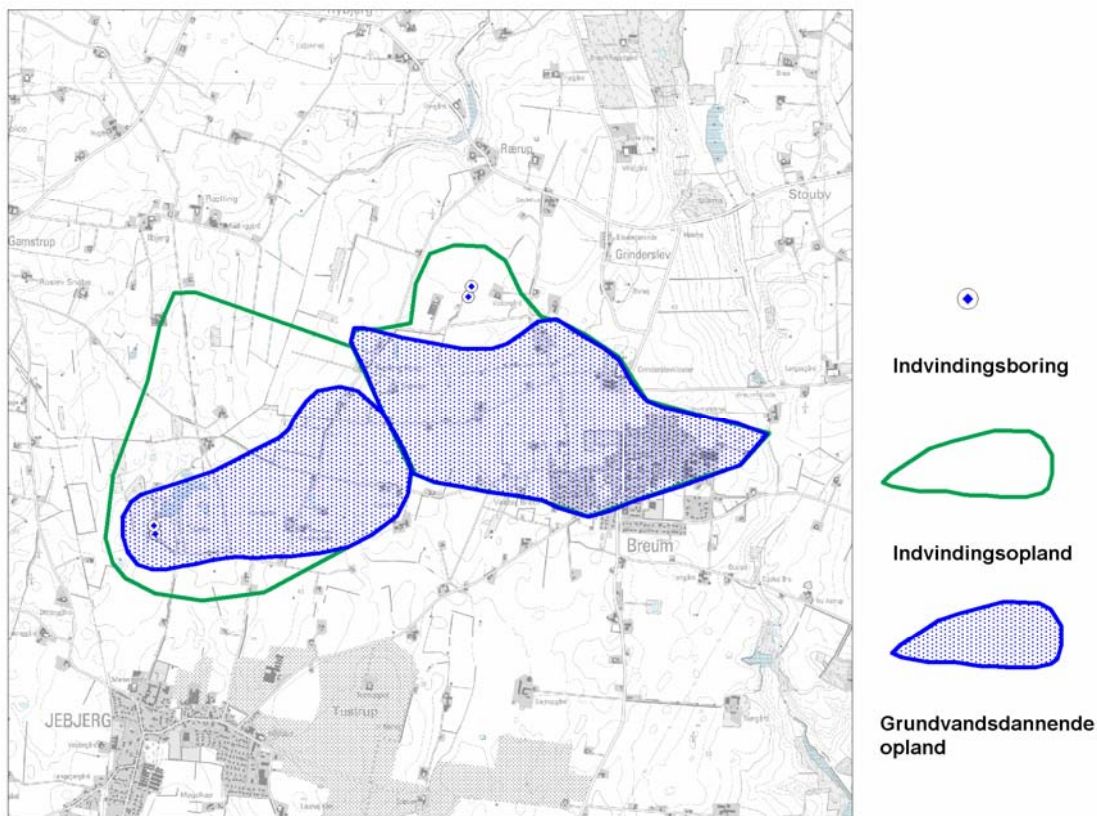
At fremstille figurer, der skitserer indvindings- og grundvandsdannende oplande, er gennem årene blevet udført på flere forskellige måder (jf. kap. 9.2 Appendiks B). Dette skyldes til dels, at der i amterne har været forskel på, om man har inddelt i indvindings- og grundvandsdannende oplande, men også hvilke traditioner de enkelte amter har haft med at udføre arbejdet. Endelig har der også været stor forskel på fra amt til amt om arbejdet har været lagt ud til mange forskellige konsulenter, eller om opgaven er blevet løst "i huset" med et fastlagt koncept.

I det følgende redegøres der kort for, hvilke data og korttemaer der bør indgå i forbindelse med afrapporteringen fra modelsimuleringer.

5.5.1 GIS-temaer

Indvindings- og grundvandsdannende oplande

Der udarbejdes et GIS-polygon, som tab- eller shape-fil, for henholdsvis indvindings- og det grundvandsdannende referenceopland (jf. kap. 3.1). De optegnes begge med "blød hånd" uafhængig af administrative grænser og andre GIS-temaer. Det grundvandsdannende opland skal arealmæssigt være afstemt med vandbalancen, så der er overensstemmelse mellem indvindingen (Q), Infiltrationen (I) og det areal (A), hvor vandet infiltrerer ned i magasinet (jf. figur 5.3).



Figur. 5.3 GIS-polygoner som angiver henholdsvis indvindingsopland (grøn legende) og grundvandsdannende opland (blå legende) for Breum og Roslev kildeplads i Salling optegnet med "bløde" linier (Kilde: Viborg Amt, 2005).

Partikelbaner

Når der udføres partikelbaneberegninger i partikelmodulet, genererer programmet en vektor-baseret fil med informationer om de enkelte partikelbaners vej fra overfladen ned til det pågældende indvindingsfilter. Denne fil kan af både MIKE-SHE og MODPATH eksporteres som DXF-fil, der videre kan importeres over i et relevant GIS-format. Der er herved mulighed for at sammenstille de beregnede partikelbaner, der repræsenterer kildepladsens indvindingsopland, med andre relevante GIS-temaer for det pågældende område.

Anbefaling:

Det anbefales at der for referenceoplandet genereres en DXF-fil og tilhørende GIS-fil som tab- eller shape-fil for det pågældende opland, der angiver partikelbanernes strømningsveje (jf. figur 5.3).

5.5.2 Partikelendepunkter

Det er vigtigt, at der er tilstrækkelig med dokumentation i forbindelse med numeriske oplandsberegninger. Derfor er det særlig relevant at gemme partikelbaneendepunkter fra partikelsimuleringerne i den numeriske model, hvis man på et senere tidspunkt har brug for at ændre i sit opland, eller blot tjekke op på, hvordan det er beregnet.

Anbefaling:

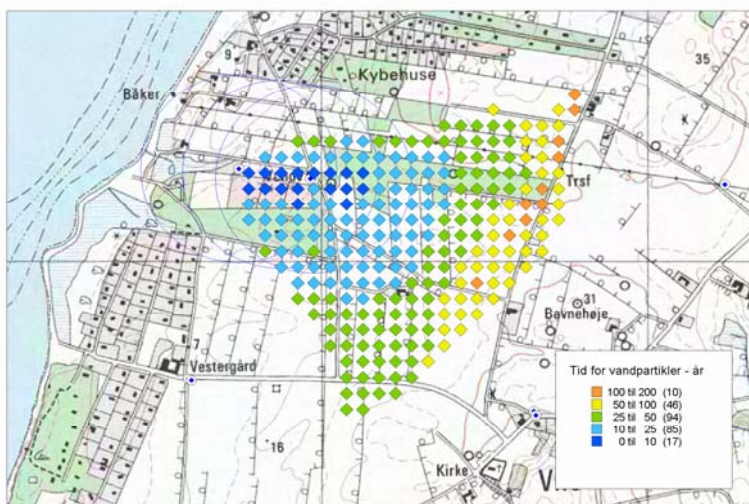
Det anbefales, at alle betydende partikelendepunkter tilhørende det grundvandsdannende referenceopland (jf. afsnit 3.1), som er genereret i partikelbaneprogrammet, gemmes som en simpel dat-fil, der senere kan indlæses i et udvalgt GIS-program til en shape- og TAB-fil. Disse GIS-filer vil efterfølgende let kunne sammenstilles med andre relevante hydrogeologiske korttemaer i forbindelse med indsatsplanlægningen.

5.5.3 Partikelaldre

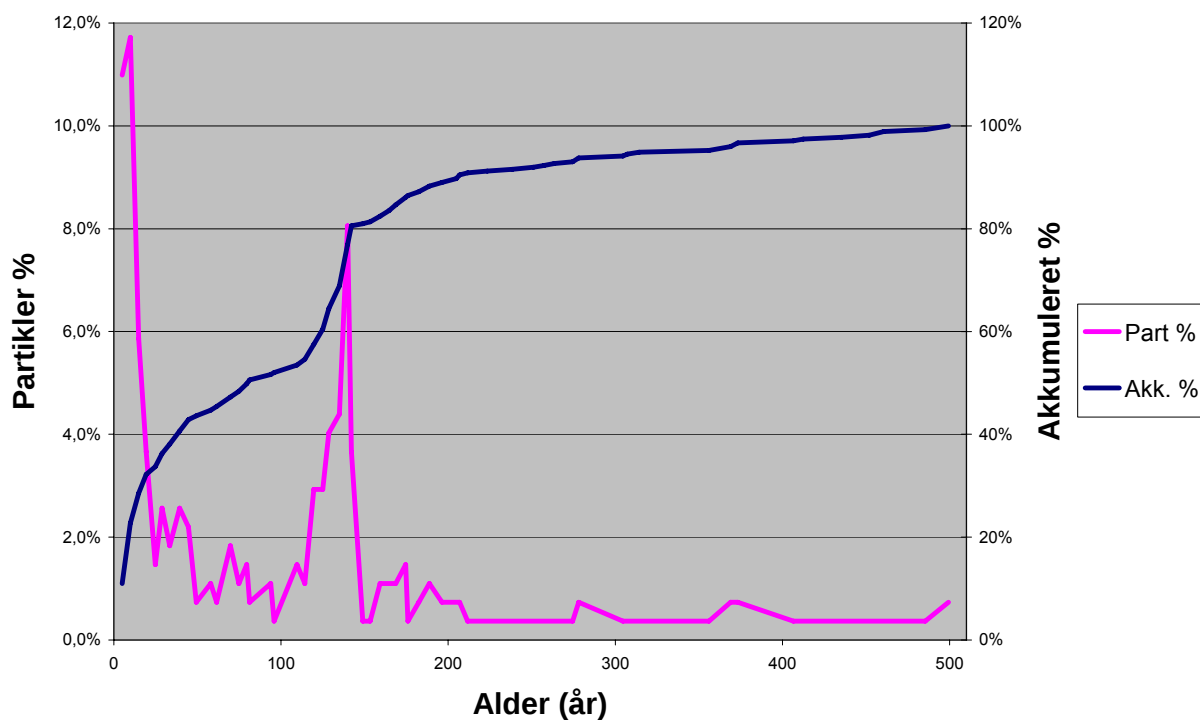
Alderen på det grundvand, som infiltrerer fra det grundvandsdannende opland, kan have afgørende betydning, når der senere skal udarbejdes en indsatsplan. Derfor er det ikke uden betydning, at alderen angives og præsenteres på en let og overskuelig måde.

Anbefaling:

Det anbefales at der for referenceoplandet udarbejdes GIS-kort som viser, hvor vandpartiklerne i det grundvandsdannende opland infiltrerer jordoverfladen. På det samme GIS-kort skal de infiltrerede vandpartikler vha. en farvelegende illustrere partiklens alder fra grundvandsspejlet og ned til det pågældende indvindingsfilter (jf. figur 5.4 nedenfor).



Figur 5.4 Oplandet til Glyngøre Vandværk i Salling, hvor de enkelte partikler angiver infiltrationsområdet eller det grundvandsdannende opland med transporttiden fra overfladen og ned til indvindingsfilteret. Kilde: Viborg Amt 2003).



Figur 5.5 Grundvandets aldersfordeling beregnet ud fra partikelbaneberegninger.

Anbefaling:

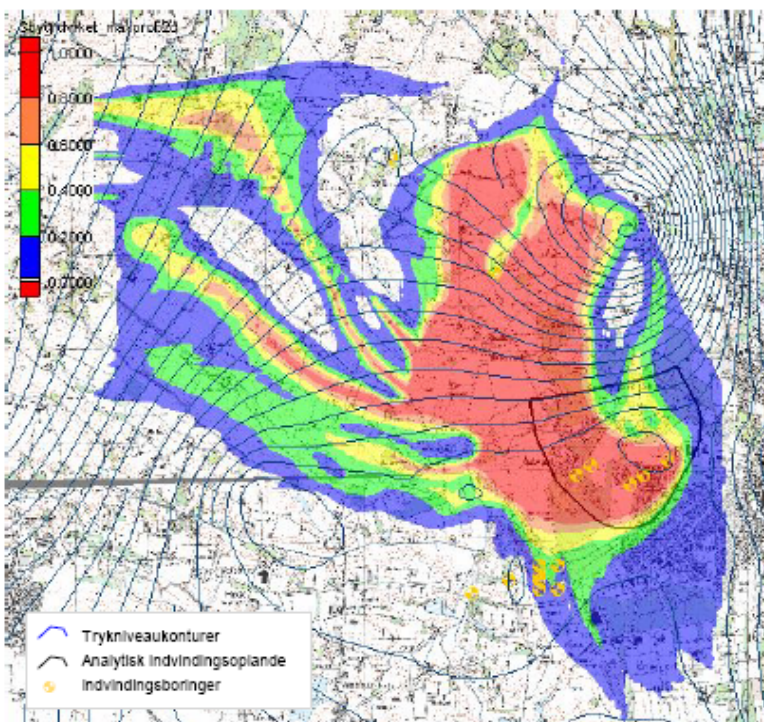
Det anbefales, at der udarbejdes fordelingskurver med alderen af det infiltrerede grundvand til den pågældende kildeplads, hvor transporttiden fra grundvandsspejlet og ned til indvindingsfilteret er skitseret på x-aksen og den %-vise fordeling samt den kumulative fordeling er angivet på y-aksen (jf. figur 5.5).

5.5.4 Stokastiske oplande og figurer

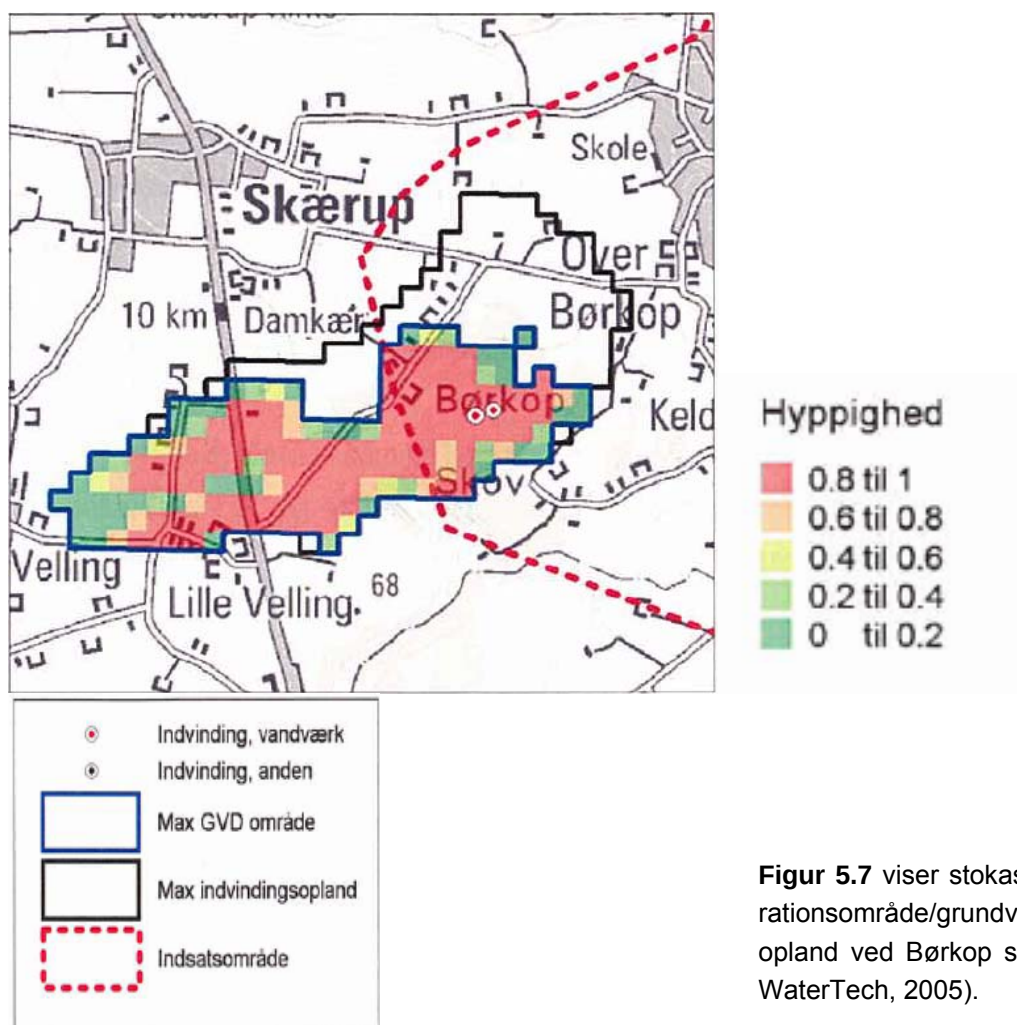
De stokastiske oplande kan både bestemmes og visualiseres for indvindings- og grundvandsdannende oplande. Det stokastiske opland viser den arealdistribuerede sandsynlighed for, at der inden for et givent område eller beregningscelle foregår en grundvandsstrømning eller en grundvandsdannelse (jf. afsnit 5.4.5 omkring den stokastiske metode). Denne sandsynlighed kan skitseres vha. en farveskala, som det ses i eksemplerne på figur 5.6 og 5.7, hvor de røde farver skitserer områder, hvor der er mellem 80-100 % sandsynlighed for, at der foregår en grundvandsstrømning inden for området. De øvrige områder (orange-blå), hvor der er mellem 0-80 % sandsynlighed for, at der foregår en grundvandsstrømning medtages ikke i fastlæggelsen af det stokastiske indvindingsopland.

Anbefaling:

Det anbefales, at områder hvor der ifølge den stokastiske metode er mellem 80-100 % sandsynlighed for at der foregår en grundvandsstrømning til indvindingsboringen udpeges som indvindingsopland til den pågældende kildeplads.



Figur 5.6 viser stokastisk beregnet indvindingsopland for Sæbygårdværket ved Sæby i Nordjylland (Kilde: MC-Aalborg-Rambøll, 2007).



Figur 5.7 viser stokastisk beregnet infiltrationsområde/grundvandsdannende opland ved Børkop syd for Vejle (Kilde: WaterTech, 2005).

Den stokastiske metode kan, som før nævnt, anvendes til at bestemme den arealdistribuerede sandsynlighed for, at der foregår en grundvandsdannelse inden for den pågældende beregningscelle, hvilket er skitseret i figur 5.7 for Børkop vandværk syd for Vejle.

Anbefaling:

Det anbefales, at der for alle modelberegnete indvindings- og grundvandsdannende oplande udføres stokastiske oplandsberegninger. Stokastiske beregninger for både indvindings- og grundvandsdannende oplande skal angives med de sandsynligheder og %-intervaller, som skitseret ovenfor (jf. figur 5.7).

Anbefaling:

Det anbefales, at områder hvor der ifølge den stokastiske metode er mellem 80-100 % sandsynlighed for, at der foregår en grundvandsdannelse til den pågældende kildeplads, udpeges til at udgøre det grundvandsdannende opland.

5.5.5 Figurer og data der bør udarbejdes og gemmes:

Der udarbejdes GIS-polygoner, som tab- eller shape-fil, for henholdsvis indvindings- og grundvandsdannende referenceopland (jf. 3.2 side 14 om referenceopland).

Anbefaling:

Det anbefales, at der for referenceoplandet genereres en DXF-fil og tilhørende GIS-fil som tab- eller shape-fil for det pågældende opland, der angiver partikelbanernes strømningsveje.

Anbefaling:

Det anbefales, at alle betydende partikelendepunkter tilhørende det grundvandsdannende referenceopland, som er genereret i partikelbaneprogrammet, gemmes som en simpel dat-fil der senere kan indlæses i et udvalgt GIS-program til en shape- og TAB-fil.

Der skal for referenceoplandet udarbejdes GIS-kort som viser, hvor vandpartiklerne i det grundvandsdannede opland infiltrerer jordoverfladen. Det samme GIS-kort skal indeholde informationer om de infiltrerede vandpartiklers alder fra grundvandsspejlet og ned til det pågældende indvindingsfilter, og alderen illustreres vha. en farvelegende.

Anbefaling:

Det anbefales, at der udarbejdes fordelingskurver med alderen af det infiltrerede grundvand til den pågældende kildeplads, hvor transporttiden fra grundvandsspejlet og ned til indvindingsfilteret angives på x-aksen. Den %-vise fordeling samt den kumulative fordeling angives på y-aksen.

Anbefaling:

Det anbefales, at der for alle modelberegnete indvindings- og grundvandsdannende oplande udføres stokastiske oplandsberegninger. Stokastiske beregninger for både indvindings- og grundvandsdannende oplande skal angives med de sandsynligheder og % -intervaller, som er skitseret ovenfor.

5.5.6 Sammenstilling og tolkning af opland

Ud fra en række forskellige scenarier med tilhørende partikelbaneberegninger og stokastiske oplande skal henholdsvis indvindingsoplandet og det grundvandsdannende opland udpeges med den størst mulige sikkerhed. Hvis man helt overordnet ser på både stokastiske oplandsberegninger og f.eks. oplande fastlagt ud fra dynamiske modelkørsler, vil man ofte se, at arealet på det grundvandsdannende opland ikke stemmer med indvindingens størrelse og den infiltration, som foregår i området. Arealet vil ofte være langt større end det areal der påkræves i forhold til den indvinding der foregår. Vandbalancen stemmer således ikke for det pågældende opland og må tilrettes (jf. 5.3.4). Dette er ret uhensigtsmæssigt i forhold til administrationen i kommunerne og i forbindelse med udarbejdelse af indsatsplaner, hvis de grundvandsdannende oplande optegnes måske 1 til 2 gange større, end hvad de egentligt beretter.

Anbefaling:

Det anbefales, at arealet der fastlægges som det grundvandsdannede opland optegnes, så det arealmæssigt stemmer overens med infiltrationen og indvindingen i den pågældende boring. Man har således på forhånd givet et areal ud fra vandbalancebetragtninger, som man må fordele inden for det stokastiske opland eller andre scenarieberegne- de oplande.

For indvindingsoplandet anbefales det som før nævnt, at områder, hvor der ifølge den stokastiske metode er mellem 80-100 % sandsynlighed for, at der foregår en grundvandsstrømning, udpeges som indvindingsopland til den pågældende kildeplads. Samtidig skeles der til andre udførte scenarieberegninger, hvor man forsøger at ændre på indvindingen og infiltrationen (jf. scenarier i tabel 5.1 og 5.2 side 72). Det udpegede indvindingsopland udgør således totaloplandet af alle udførte realistiske scenarier over det pågældende indvindingsopland.

Anbefaling:

Det anbefales endvidere at der lægges en sikkerhedsmargin ind på det modelbereg- nede indvindingsopland i forhold til de beregnede partikelbaner. Denne sikkerheds- margin skal skildre den numeriske modeldiskretisering og det er derfor modellens celledørrelse som er afgørende for, hvor stor en usikkerhed der skal tillægges det modelberegne- de opland. Med en cellediskretisering på 100*100 meter vil der såle- des lægges en usikkerhedsmargin ind på 100 meter rundt om hele det beregnede indvindingsopland. Dette areal vil således udgøre indvindingsoplandet til den pågæl- dende kildeplads.

Indvindingsoplandet vil således som udgangspunkt altid blive noget større end det grund- vandsdannende opland hvor der ikke lægges denne sikkerhedsmargin ind.

Eksempel 1: Anbefalet arbejdsgang i udpegning af et indvindingsopland

På figur 5.8A-E er der skitseret et eksempel, som en anbefalet arbejdsgang i, hvordan man beregner og fastlægger henholdsvis sit indvindingsopland (referenceopland) og det grundvandsdannende opland (referenceopland) og det endelige indvindingsopland, som er fastlagt ud fra den stokastiske metode.

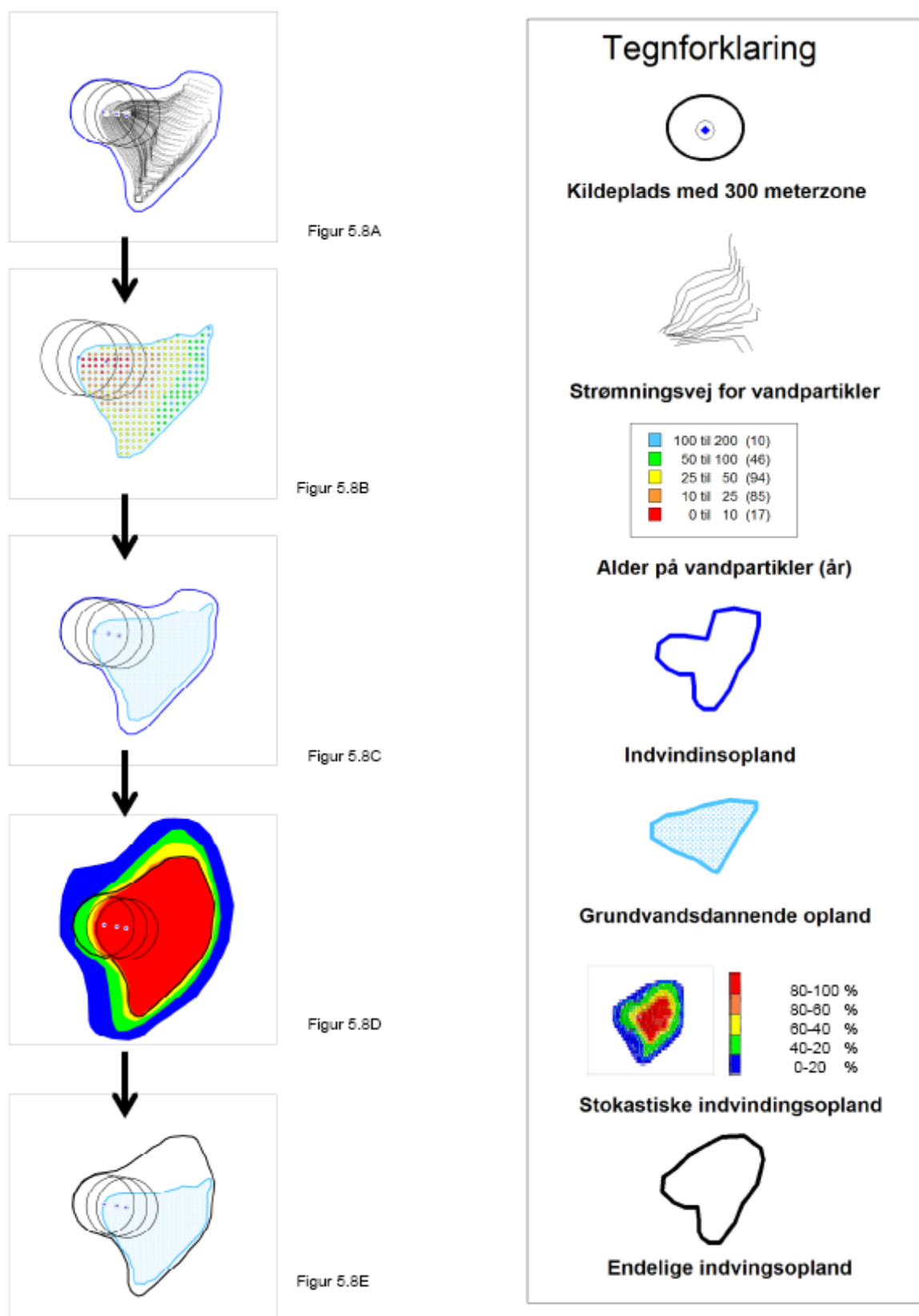
Figur 5.8A skitserer hvordan man først beregner indvindingsoplandet (referenceoplandet) ud fra partikelbaneregninger, hvor partiklernes strømningsbaner udgør indvindingsoplandet. Bemærk at der er lagt en buffer på 100 meter rundt om partikelbanelinierne, svarende til cellediskretiseringen på den numeriske model (jf. 5.5.6). Samtidig er kildepladsens 300-meter zone lagt ind som en del af indvindingsoplandet.

Dernæst bestemmer man vha. partikelendepunkterne det grundvandsdannende referenceopland, hvor aldersfordelingen er skitseret fra 0-200 år i samme figur 5.8B. Det markerede opland svarer til det grundvandsdannende referenceopland og er nøje afstemt med vandbalancen således at indvindingen, nedbøren og det samlede areal på det grundvandsdannende areal stemmer over ens. Der er således ikke lagt nogen usikkerhedsbuffer ind på det grundvandsdannende referenceopland.

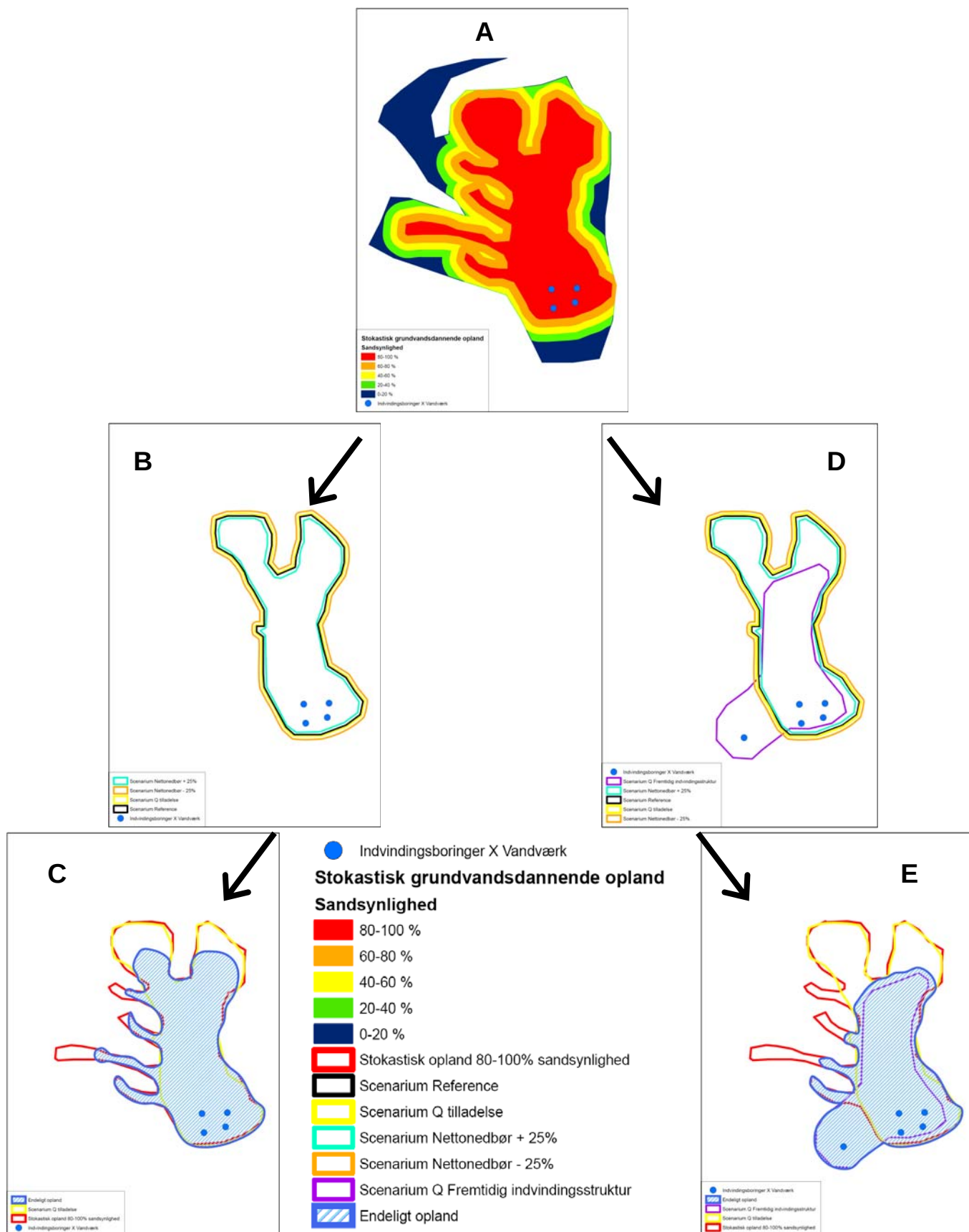
Referenceoplandet for henholdsvis indvindings- og grundvandsdannende opland er skitseret i figur 5.8C.

Der er nu mulighed for at belyse usikkerhederne i oplandsbestemmelsen enten vha. udvalgte scenarier, som er anbefalet i tabel 5.1 og 5.2, side 72, men man kan også vælge udelukkende at fokusere på de usikkerheder, som er forbundet med de hydrauliske parametre i den numeriske grundvandsmodel. Dette kan belyses ud fra den stokastiske metode som er beskrevet ovenfor i afsnit 5.4.5. Vælger man den stokastiske metode, er der på figur 5.8D vist, hvordan man fastlægger sit indvindingsopland. Modelceller, hvor der er mellem 80-100 % sandsynlighed for, at der foregår en grundvandsstrømning til indvindingen, udgør nu indvindingsoplandet. Det bemærkes at indvindingsoplandet nu øges i udbredelse i forhold til referenceoplandet, da de stokastiske beregninger antyder, at der er sandsynlighed for en grundvandsstrømning i den nordlige del af oplandet.

På figur 5.8E er indvindingsoplandet retolket ud fra den stokastiske beregning og sammenstillet med det grundvandsdannende referenceopland. Det grundvandsdannende opland kan på tilsvarende vis revurderes ud fra en stokastisk beregning, men her er det vigtig at holde sig for øje, at arealet på det grundvandsdannende opland skal passe med vandbalancen (jf. anbefaling 5.5.6 side 67).



Figur 5.8 A-E skitserer en anbefalet arbejdsgang i, hvordan man beregner og fastlægger henholdsvis sit indvindingsopland (referenceopland) og det grundvandsdannende opland (referenceopland).



Figur 5.9. Eksempel på udpegnig af et grundvandsdannende opland.

Eksempel 2: Anbefalet arbejdsgang i udpegning af et grundvandsdannende opland

I. Et vandværk indvinder fra 4 indvindingsboringer. Det grundvandsdannende opland beregnes med en numerisk grundvandsmodel, hvor der er udført forskellige scenarier på henholdsvis indvindingen Q og nedsivningen I . Samtidig er der udført stokastiske beregninger for referencesituationen (jf. figur 5.9A). De grundvandsdannende oplande for scenarierne er vist på figur 5.9B. Fastlæggelsen af det endelige grundvandsdannende opland baseres på foreningsmængden af 1) det område, hvor sandsynligheden er 80-100 % for at det indgår i oplandet og 2) oplandet for det scenarium, hvor vandværket med de nuværende boringer indvinder det, de har tilladelse til (jf. figur 5.9C). Udpegningen af det grundvandsdannende opland, sker ved en beskæring og udglatning af oplandet, så grundvandsdannelsen inden for oplandet svarer til den indvundne vandmængde i referencesituationen svarende til figur 5.9C.

II. Vandværket planlægger nu en femte indvindingsboring. I tillæg køres derfor et scenarium, hvor der også indvindes fra den nye boring (jf. figur 5.9D). Fastlæggelsen af det endelige grundvandsdannende opland baseres nu på foreningsmængden af 1) det område, hvor sandsynligheden er 80-100 % for at det indgår i oplandet og 2) oplandet for det scenarium, hvor vandværket med de nuværende boringer indvinder det, de har tilladelse til og 3) oplandet for det scenarium, hvor der også indvindes fra den nye boring (jf. figur 5.9E), der også viser udpegningen af det endelige grundvandsdannende opland.

5.6 Sammenfatning

I forbindelse med opsætning af den geologiske og hydrostratigrafiske model henvises der til Geo-vejledning nr. 3 om geologiske modeller, og i opstillingen af numeriske grundvandsmodeller henvises der til "Håndbog i grundvandsmodellering".

Det anbefales, at der arbejdes med en gennemgående diskretisering på 100*100 meter grids i den geologiske og numeriske grundvandsmodel når der skal udføres partikelbaneberegninger på indvindings- og grundvandsdannende oplande. Endvidere er det vigtigt at de øverste jordlag er kortlagt med overfladedækkende geofysik som PACES med en dækning på 4 linie km/ km² for at finde evt. geologiske vinduer hvor grundvandsdannelsen er stor. Det er især vigtigt, at de kalibrerede trykniveauer i fokusområderne omkring de aktuelle kildepladser stemmer godt overens med de observerede, så den numeriske model kan simulere de hydrologiske forhold i det pågældende område. Der kan accepteres en fejlmargen på de kalibrerede potentialer mod de observerede på mellem $\pm 1-3$ meter inden for det forventede opland (Sonnenborg, T.O. & Henriksen H. J., 2005).

Grundvandsdannelsens eller nettonedbørens størrelse har stor betydning for oplandets størrelse og udbredelse, og derfor anbefales det, at man udfører forskellige modelscenarier, hvor man varierer infiltrationen i forhold til den gennemsnitlige infiltration. Et bud på relevante

scenarier kan være, at man udfører 2 scenarier med henholdsvis $\pm 25\%$ af den gennemsnitlige infiltration, og på denne baggrund vurderer usikkerheden af oplandets udbredelse.

Nettonedbør		
Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
Gennemsnitlige N_{netto}	+ 25% i forhold til den	- 25% i forhold til den gen-
Svarende til referenceop-	gennemsnitlige N_{netto}	nemsnitlige N_{netto}
land		

Tabel 5.1 viser 3 forskellige scenarier hvor nettonedbøren varieres i oplandsberegningen.

Indvindingsmængden er som bekendt også styrende for oplandets størrelse og udbredelse.

Anbefaling:

Det anbefales, at der i forbindelse med kalibrering af stationære modeller køres med den tilladte indvundne vandmængde Q_{tilladte} , hvor man beregner et gennemsnit over den Q_{tilladte} over de seneste 3-5 år. Denne indvinding betegnes som reference indvindingen. Det anbefales, at der ud over referenceindvindingen (scenarie 1) køres et (scenarie 2), hvor man anvender den faktiske indvundne vandmængde ($\text{m}^3/\text{år}$) samtidig med, at der køres et (scenarie 3), hvor man giver et bedste bud på den fremtidige indvinding, for herved at gøre sine oplandsberegninger mere robuste i forhold til fremtidige ændringer i indvindingsmængden (jf. tabel 5.2).

Indvinding		
Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
Gennemsnitlige Q_{tilladte} ($\text{m}^3/\text{år}$)	Q_{faktiske} ($\text{m}^3/\text{år}$)	$Q_{\text{Fremtidig estimat}}$ ($\text{m}^3/\text{år}$)

Tabel 5.2 viser 3 forskellige scenarier hvor indvindingen varieres i oplandsberegningen.

Partikelbaneberegninger kan udføres både ud fra stationære og dynamiske modeller. Det anbefales generelt, at der anvendes dynamiske modeller, hvis data tillader det. Hvis der derimod ikke foreligger tilstrækkelig med data, opstilles som minimum en stationær model til udførelse af partikelberegninger, men det anbefales, at der efterprøves med forskellige infiltrationsværdier i forbindelse med scenarie- og usikkerhedsvurderinger i den stationære model.

6. Aflevering til kommunerne

På baggrund af den nationale grundvandskortlægning skal kommunerne udarbejde indsatsplaner for grundvandsbeskyttelse i indsatsområderne. Når kortlægningen er færdig i et indsatsområde skal resultaterne derfor overdrages til de relevante kommuner.

For at kommunerne kan udarbejde indsatsplaner for grundvandsbeskyttelse skal følgende data og afgrænsninger foreligge:

- Afgrænsning af indvindings oplande
- Afgrænsning af de grundvandsdannende områder
- Alderen af det grundvand der indvindes i oplandet
- Datablad for hvert enkelt kildeplads/opland

De arealmæssige afgrænsninger skal være ledsaget af sandsynlighedsplots til illustration af sandsynligheden for, at et givet område eller modelcelle er en del af vandværkets indvindingsopland og/eller grundvandsdannende opland.

Indsatsplanerne skal gælde i lang tid fremover, og denne udfordring kræver, at udpegningerne skal være så robuste som mulige overfor eventuelle fremtidige ændringer i vandindvindings- struktur og klima. Forskellige scenarieberegninger med f.eks. ændrede klimaforhold kan udmønte sig i densitetsplot, der viser sandsynligheden for at et givet område eller modelcelle inddrages i indvindingsoplandet eller det grundvandsdannende opland.

Såfremt der ikke er udarbejdet en numerisk grundvandsmodel må oplandsbestemmelsen baseres på de analytiske oplande/AEM (jf. afsnit 4.4), hvilket svarer til at oplandsbestemmelsen stopper på trin 2, (se nedenfor).

På baggrund af ovenstående skal følgende afleveres til kommunerne og Miljøportalen:

Hvis oplandsbestemmelsen afsluttes i trin 2:

Trin 2: Analytiske metode/AEM

- Stamblad som dokumenterer, hvordan udpegningen af oplandet er foretaget
- GIS-temaer med det endelige indvindingsopland og det endelige grundvandsdannende opland
- GIS-temaer med densitetsplot (udfaldsrum) af grundvandsdannende opland og indvindingsopland for forskellige scenarier.

Hvis der opstilles en numerisk grundvandsmodel føres oplandsbestemmelse videre til trin 3

Trin 3: Numerisk grundvandsmodel

- Stamblad som dokumenterer, hvordan udpegningen af oplandet er foretaget
- GIS-temaer med reference indvindingsopland og reference grundvandsdannende opland
- GIS-temaer med det endelige indvindingsopland og det endelige grundvandsdannende opland
- GIS-temaer med densitetsplot (udfaldsrum) af grundvandsdannende opland og indvindingsopland for forskellige scenarier
- GIS-temaer med stokastisk beregnet grundvandsdannende opland og indvindingsopland (sandsynlighedsplot)
- GIS-temaer med partikelaldre/-transporttider for reference-grundvandsdannende opland og reference-indvindingsopland
- Plot af det indvundne grundvands aldersfordelingskurve baseret på reference-oplandspartikelkørslen
- Visualisering af reference-oplandets partikelbaner i GeoScene-3D.

7. Fremgangsmåde og anbefalinger

Nu følger en gennemgang af de anbefalinger, som arbejdsgruppen er kommet med gennem sit arbejde. Fremgangsmåden i at udpege indvindings- og grundvandsdannende oplande er inddelt i 3 hovedtrin som ligger i tråd med de trin man normalt arbejder med i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning, hvor alle geologiske og hydrogeologiske discipliner indgår. Anbefalingerne er grupperet under de enkelte trin, således at de præsenteres i relevant rækkefølge.

7.1 Valg af analytisk eller modelberegnete oplande

Oplandsberegninger udført på baggrund af analytiske og semianalytiske modeller kan være misvisende og ikke gode nok, da de ofte forsimples en kompleks hydrogeologisk opbygning. Derfor er det at foretrække at anvende numeriske grundvandsmodeller til bestemmelse af oplande (Springer and Bair 1992). Projektgruppens generelle holdning er således også, at der i forbindelse med gebyrkortlægningen som udgangspunkt altid bestemmes indvindings- og grundvandsdannende oplande ud fra numeriske strømningsmodeller.

Der vil dog være tilfælde, hvor man bør overveje om det er umagen værd at opstille en grundvandsmodel. I områder hvor der ikke er midler til at kortlægge områdets geologi tilstrækkeligt, vil det være passende at udarbejde analytiske oplande. Hvis befolkningstætheden f.eks. er meget tynd og der heraf forekommer små indvindinger, er det måske ikke rentabelt at bruge mange ressourcer i et sådant område.

Endelig kan der være områder, hvor de geologiske og hydrogeologiske forhold er så enkle, at forudsætningerne for de analytiske oplandsberegninger med rimelighed kan antages at være til stede. Her vil man kunne afslutte kortlægningen med at rapportere de analytiske oplande svarende til Trin 2 (jf. nedenfor beskrivelsen af de enkelte trin 1-3).

Arbejdsgruppens anbefaler at følgende trin fra 1 til 3 anvendes (se figur 7.1 nedenfor):

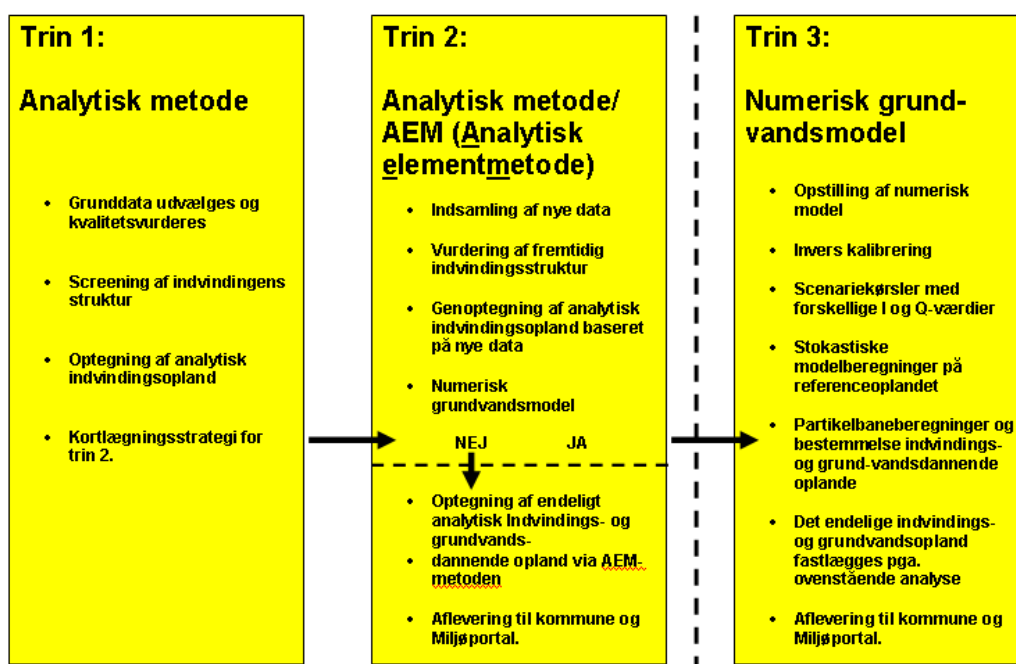
Fremgangsmåde

Trin 1 Det anbefales, at der som udgangspunkt altid udarbejdes et analytisk opland i en screeningsfase på baggrund af eksisterende data som en del af den indledende kortlægning.

Trin 2 Der udføres en ny analytisk oplandsberegning på baggrund af den nye hydrogeologiske kortlægning. Hvis der ikke opstilles en numerisk grundvandsmodel udføres den analytiske oplandsberegning vha. AEM-metoden (jf. afsnit 4.4) og resultaterne heraf afrapporteres til kommunerne og Miljøportalen.

Trin 3 Der opstilles en geologisk model og efterfølgende grundvandsmodel, og et numerisk indvindings- og grundvandsdannende opland beregnes.

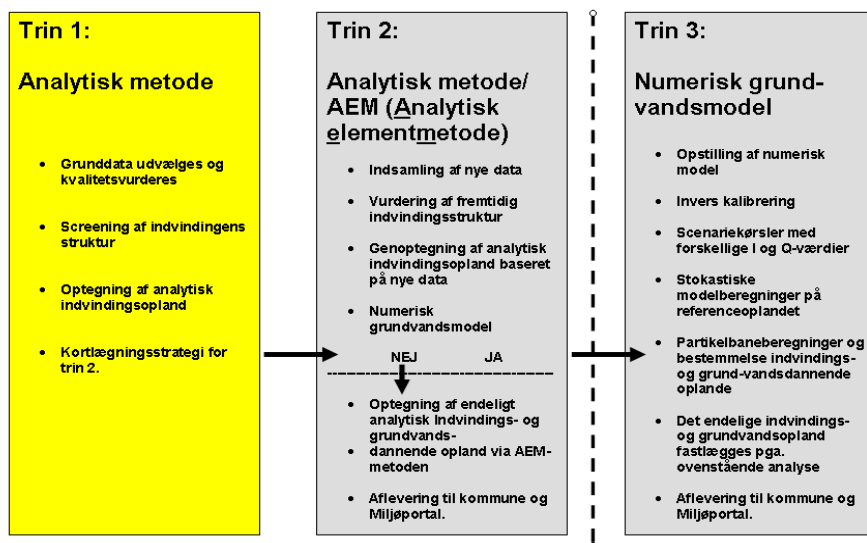
Som det fremgår af ovenstående 3 trin bør indvindingsoplande tænkes med ind i hele kortlægningsforløbet fra start til slut. De 3 trin vil nu i det følgende blive mere udførligt gennemgået sammenholdt med relevante anbefalinger inden for de 3 trin.



Figur 7.1 Beskrivelse af de 3 trin i forbindelse med bestemmelse af oplande.

Trin 1 Optegning af analytisk opland ud fra eksisterende data

Når et miljøcenter påbegynder grundvandskortlægningen i et nyt indsatsområde, vil det typisk ske i form af en "trin 1 rapport", der samler op på den viden, der findes om området i forskellige rapporter og databaser. I forbindelse med dette indledende arbejde, bør der optegnes oplande for alle vandværker, der ligger i undersøgelsesområdet. Oplandene kan enten være genbrug eller helt nyberegnete oplande fra tidligere, enten analytisk beregnede eller fra modelberegnete oplande.



Figur 7.2 Beskrivelse af trin 1 i forbindelse med bestemmelse af oplande.

Det kan være en god idé i kortlægningens tidlige fase at indsamle relevante data, som f.eks. pejletidsserier fra boringer eller vandføringstidsserier fra vandløb og prøvepumpningsdata, så den hydrogeologiske forståelse for det kortlagte område bygger på så mange data som muligt.

Oplandene fra Trin 1-kortlægningen skal bruges i Trin 2-kortlægningen, så det sikres, at de rigtige data indsamles i de områder, der kan udgøre oplandene. Dette bør gøres for at sikre sig den bedste datadækning til de senere numerisk beregnede oplande i Trin 3. Oplandene i Trin 1 skal derfor være totaloplande der både skal indeholde indvindingsoplandet og det grundvandsdannende opland, og som godt kan have en udbredelse helt tilbage til grundvandsskel.

Anbefalinger

Anbefaling:

Det anbefales at bruge den tilladte indvinding $Q_{\text{tilladelse}}$, når oplande beregnes ud fra den analytiske metode, idet den er mere robust og fremtidssikret, og tager højde for eventuelle stigninger i indvindingsmængderne. Såfremt $Q_{\text{tilladelse}}$ ligger under $50.000 \text{ m}^3/\text{år}$ anbefales det, at runde op og benytte en Q på $50.000 \text{ m}^3/\text{år}$, da der er større arealmæssig usikkerhed i optegning af analytiske oplande for meget små indvindinger (jf. 4.1.2.1).

Vandbalanceopgørelser på oplandsniveau er et vigtigt redskab i fastlæggelsen af det grundvandsdannende opland.:

Anbefaling:

Derfor anbefales det, at der bestemmes en vandbalance for hvert analytisk beregnet grundvandsdannende opland.

Anbefaling:

Det anbefales, at man i analytiske beregningssituationer, hvor der foreligger flere T-værdier, bruger tid på at finde de mest troværdige T-værdier nær borerne. Hvis der er flere værdier, anvendes en middelværdi eller en værdi lidt lavere for at være på den sikre side (jf. 4.0)

Anbefaling:

Det anbefales, at gradienten på grundvandsspejlet beregnes ud fra pejlinger, der er foretaget i samme magasin, som indvindingsboringerne er filtersat i (jf. 4.0).

Anbefaling:

For et spændt magasin med fladt vandspejl anbefales det, at lade oplandet brede sig til nærmeste vandløb eller sø, der vurderes at udgøre en robust grænse. I kystnære områder udgør kysten en naturlig grænse (jf. 4.1.1.2).

Anbefaling:

For frie magasiner med fladt vandspejl anbefales det at lade oplandet optegne efter formel 4.3 og indsætte en tid (t), svarende til sommerhalvåret, hvor der ikke dannes grundvand af betydning (jf. 4.1.1.2).

Anbefaling:

Det anbefales at afstanden mellem indvindingsboringen og den asymptotiske oplandsbredde sættes lig med den asymptotiske oplandsbredde (jf. 4.1.2.1).

Anbefaling:

De parabelformede oplande bør så vidt muligt følge strømlinjerne bagud i oplandet, og dets siderne føres bagud til de naturligt mødes eller til de rammer et grundvandsskel. oplandsbredde (jf. 4.1.2.1).

Anbefalinger:

For vandværker med flere boringer anbefales det at optegne et "boringsopland" til den enkelte boring. Før indvindingen fordeles ud på boringerne anbefales det at kontakte vandværket for at få oplyst, hvordan indvindingen på årsbasis fordeler sig på boringerne (jf. 4.2).

Anbefaling:

Det anbefales, at optegne indvindingsoplandet, så det omkranser alle borings- og kildepladspunkters beregnede stagnationspunkter og indeholder alle oplandsbredder (jf. 4.2.2.1).

Anbefaling:

Når der indvindes fra flere adskilte grundvandsmagasiner anbefales det er der beregnes særskilte indvindingsoplande for hvert grundvandsmagasin (jf. 4.2.3).

Anbefalinger:

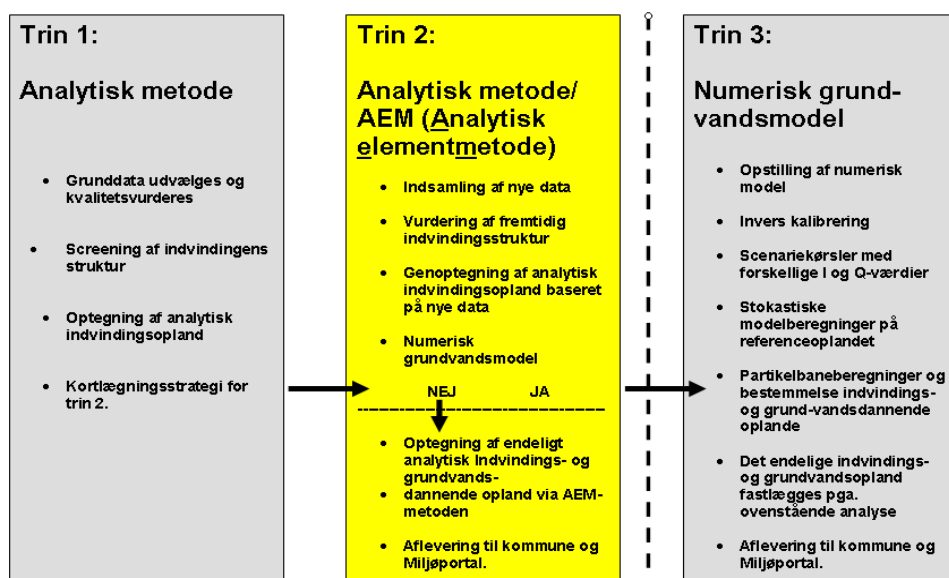
Det anbefales at lade indvindingsoplandet optegne som to separate oplande til kildepladsen, hvis afstanden mellem strømlinjerne gennem to naboboringer er større end summen af boringernes asymptotiske oplandsbredder (jf. 4.2.2.2).

Anbefaling:

Det anbefales, at man samtidig med optegningen af analytiske indvindingsoplande, udfylder et datablad med alle relevante oplysninger om kildepladsen og det tilhørende opland, der har indflydelse på oplandsbestemmelsen (jf. 4.0).

Trin 2, optegning af analytisk opland ud fra nye kortlægningsdata

Under kortlægningsfasens Trin 2 bør de analytiske oplande fra Trin 1 inddrages i planlægningsfasen for at sikre sig, at der i kortlægningsfasen indsamles tilstrækkelig med viden til at forbedre datagrundlaget for en detaljeret grundvandsmodel. .



Figur 7.3 Beskrivelse af trin 2 i forbindelse med bestemmelse af oplande.

Man skal dog være opmærksom på, at det ikke er nok med en god datadækning inden for indvindingsoplandet. Det er vigtigt at geologi, potentialer m.m. også kortlægges detaljeret i et større område omkring den første udpegning af indvindingsoplandet. Dette vil give en mere pålidelig grundvandsmodel at genberegne indvindingsoplande ud fra. Man skal specielt være opmærksom på, at usikkerheden er stor på beliggenheden af oplande til små indvindinger, der ligger langt fra grundvandsskel. Indvindingsoplandet vil typisk være udformet med en tynd lang hale op i baglandet.

Anbefalinger

Efterhånden som Trin 2's kortlægningsresultater færdiggøres

Anbefaling:

anbefales det, at man genberegner det analytiske opland for at sikre sig, at man også efter de nye beregninger har et godt datagrundlag inden for oplandet at arbejde videre med. Det kan måske komme på tale at supplere med nye data, hvis oplandet har ændret sig væsentligt i størrelse og retning fra Trin 1 til Trin 2 i kortlægningen.

Man er nu klar til at gå videre med opstilling af den numeriske grundvandsmodel, som skal anvendes til at udføre de endelige oplandsberegninger.

Anbefaling:

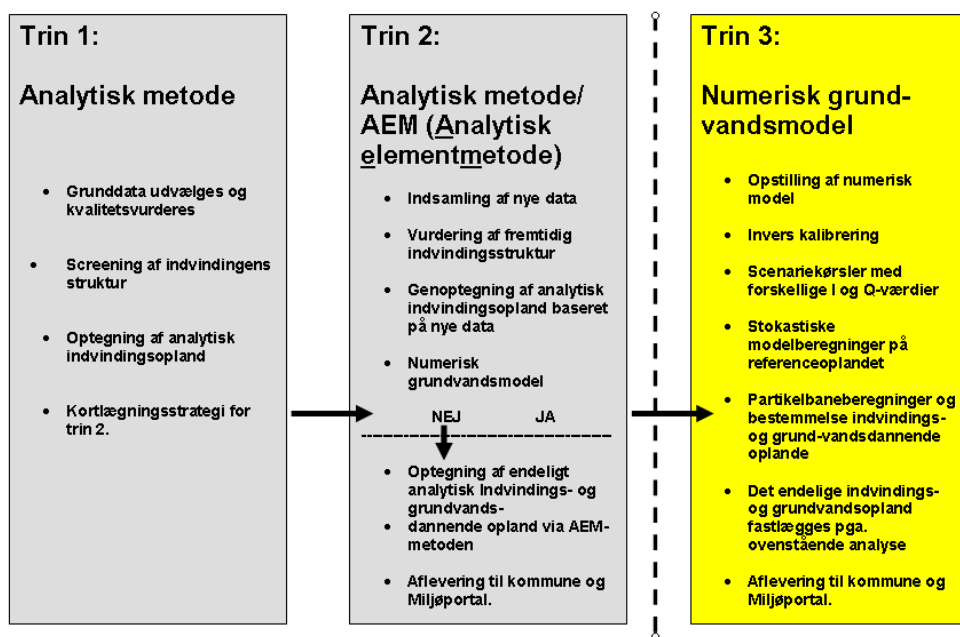
Hvis det besluttet, at der ikke opstilles en numerisk grundvandsmodel, anbefales det at der udføres en analytisk oplandsberegning vha. AEM (jf. afsnit 4.4).

AEM er en analytisk elementmetode eller en forsimplet numerisk model, som både kan beregne indvindingsoplandet og det grundvandsdannende opland. De nyberegnete oplande afrapporteres efterfølgende til kommunerne og Miljøportalen.

AEM vil blive yderligere belyst i fase 2-projektet og således blive mere grundig beskrevet i Geo-vejledningens 2. del.

Trin 3 Opstilling af numerisk model

Når kortlægningsarbejdet i felten er overstået, skal der opstilles en geologisk model og efterfølgende en grundvandsmodel for indsatsområdet, der kan tage hensyn til geologiske og hydrologiske variationer i 3 dimensioner. Ud fra partikelbanesimuleringer, hvor der udføres en række forskellige scenarier (jf. afsnit 5.6), kan indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande udpeges. På baggrund af usikkerhedsberegninger kan oplandene herved justeres (jf. afsnit 5.3).



Figur 7.4 Beskrivelse af trin 3 i forbindelse med bestemmelse af oplande.

Anbefalinger

Anbefaling:

Der er udarbejdet en Geo-vejledning af GEUS i opstilling af geologiske modeller, og det anbefales, at den geologiske og hydrostratigrafiske model opstilles efter denne vejledning (Jørgensen, et. al., 2008).

Der angives her helt overordnet, hvilke grundprincipper man skal overholde i forbindelse med opstilling af henholdsvis den geologiske og hydrogeologiske model:

Anbefaling:

Det anbefales at profiler, som skal danne grundlag for den geologiske model maksimalt må have en indbydes afstand på 500 meter imellem hver profilinie. Endvidere anbefales det, at der arbejdes med en gennemgående diskretisering på 100*100 meter grids i den geologiske og i den numeriske grundvandsmodel.

En grovere diskretisering giver for store usikkerheder i forhold til de udpegninger, som skal udføres i forbindelse med indsatsplaner. En finere diskretisering på f.eks. 50*50 eller 25*25

meter kan være en god løsning man kan vælge at anvende i kildepladsnære områder, hvilket vil gøre partikelbaneberegningerne mere robuste især for mindre indvindinger (50.000-100.000 m³/år) (Zheng, C., 1992).

Anbefaling:

Der er udarbejdet en håndbog af GEUS i opstilling numeriske grundvandsmodeller, og det anbefales, at den numeriske model opstiles efter denne håndbog.

Anbefaling:

Det anbefales, at der i forbindelse med modelberegnete grundvandsdannende oplande er stor fokus på vandbalancen inden for det enkelte opland (jf. 5.3.4).

Anbefaling:

Det anbefales, at man udfører forskellige modelscenarier, hvor man varierer på infiltrationen i forhold til den gennemsnitlige infiltration. Et bud på relevante scenarier kan være, at man udfører 2 scenarier med henholdsvis $\pm 25\%$ af den gennemsnitlige infiltration, og på denne baggrund vurderer usikkerheden på oplandets *udbredelse* (jf. afsnit 5.3.5).

Anbefaling:

Det anbefales, at der i forbindelse med kalibrering af stationære modeller køres med den tilladte indvundne vandmængde Q_{tilladte} , hvor man beregner et gennemsnit over den Q_{tilladte} over de seneste 3-5 år. Denne indvinding betegnes som reference indvindingen. Det anbefales, at der ud over referenceindvindingen (scenarie 1) køres et (scenarie 2), hvor man anvender den faktiske indvundne vandmængde (m³/år) samtidig med, at der køres et (scenarie 3), hvor man giver et bedste bud på den fremtidige indvinding, for herved at gøre sine oplandsberegninger mere robuste i forhold til fremtidige ændringer i indvindingsmængden (jf. afsnit 5.3.5).

De numerisk bestemte oplande skal anvendes med stor omtanke. Dvs. er der et opland som ser urealistisk ud mht. udbredelse, skal dette gentolkes og en evt. gennemgang af den numeriske model for fejl og mangler bør foretages.

Partikelbaneberegninger kan udføres både ud fra stationære og dynamiske modeller.

Anbefaling:

Det anbefales generelt, at der anvendes dynamiske modeller, hvis data tillader det. Foreligger der lange pejle- og vandføringstidsserier, er det muligt at opstille en dynamisk model, der udnytter de observerede data bedst muligt og således giver mulighed for en grundigere og mere sikker kalibrering i forhold til en stationær model (jf. afsnit 5.3.6).

Hvis der derimod ikke foreligger tilstrækkelig med data, er det også tilstrækkeligt at opstille en stationær model til udførelse af partikelberegninger. Her anbefales det dog at der for stationære modeller efterprøves med forskellige infiltrationsværdier i forbindelse med scenarie-usikkerhedsvurderinger.

Partikelbaneberegninger**Anbefaling:**

Det anbefales, at der i forbindelse med beregning af det grundvandsdannende opland placeres minimum 4 og maksimalt 25 partikler i hver beregningscelle i det øverste aktive modellag, hvor der foregår en grundvandsstrømning. Disse partikler fordeles jævnt ud i toppen af det øverste aktive modellag over et område, som er en del større end det forventede grundvandsdannende opland. Partiklerne fra overfladen beregnes forward ned til det pågældende indvindingsfilter og de partikler, som finder vej til indvindingsfilteret, udgør det grundvandsdannende opland.

Usikkerhedsbetragtninger

Stokastiske oplande, hvor usikkerheden på relevante hydrauliske parametre vurderes, er en god øvelse i forbindelse med oplandsberegninger (jf. afsnit 5.4.5.).

Anbefaling:

Det kan generelt anbefales, at der foretages en invers kalibrering, dvs. bestemmelse af de følsomme parametre ved ikke-lineær regression, da usikkerheden på parametrene fås som et produkt heraf. Det er en forudsætning for, at man kan anvende usikkerhederne på de estimerede parametre, eksempelvis angivet ved 95 % konfidensintervaller, at residualerne (forskellene mellem de målte og de simulerede værdier) varierer tilfældigt i både tid og rum og at de er normalfordelte (Christensen, S., 1998).

Såfremt forudsætningerne er opfyldt, kan de fundne usikkerheder herefter danne grundlag for en stokastisk analyse, hvor effekten af parameterusikkerheden kvantificeres.

Anbefaling:

Det anbefales, at der som standard for alle modelberegnete indvindings- og grundvandsdannende oplande udføres stokastiske oplandsberegninger. Stokastiske beregninger for både indvindings- og grundvandsdannende oplande skal angives med de sandsynligheder og % -intervaller, som er skitseret i afsnit 5.5.4.

Anbefaling:

Det anbefales, at områder hvor der ifølge den stokastiske metode er mellem 80-100 % sandsynlighed for, at der foregår en grundvandsdannelse til den pågældende kildeplads, udpeges til at udgøre det grundvandsdannende opland.

Indvindingsoplande uden for OSD er ofte mindre kildepladser, der ligger som isolerede "satellitter" og deres oplandsafgrænsning kan derfor have stor betydning for administrationen ude i den enkelte kommune, f.eks. i forbindelse med fremtidige VVM- afgørelser.

Anbefaling:

Derfor anbefales det, at der lægges en sikkerhedsmargin ind i forhold til de beregnede partikelbaner. Denne sikkerhedsmargin skal skildre den numeriske modeldiskretisering og det er derfor modellens cellestørrelse som er afgørende for, hvor stor en usikkerhed der skal tillægges det modelberegnete opland. Med en cellediskretisering på 100*100 meter vil der således lægges en usikkerhedsmargin ind på 100 meter rundt om hele det beregnede indvindingsopland. Dette areal vil således udgøre indvindingsoplandet til den pågældende kildeplads.

Aflevering og dokumentation, figurer og layout

Det tilstræbes, at der klart skelnes imellem indvindings- og grundvandsdannende oplande, når oplandene er bestemt ud fra numerisk beregnede modelkørsler.

Der udarbejdes et GIS-polygon for henholdsvis indvindings- og det grundvandsdannende referenceopland (jf. kap. 3, side 11). De optegnes begge med "blød hånd" uafhængig af markblokke, byer og andre GIS-temaer. Det grundvandsdannende opland skal arealmæssigt være afstemt med vandbalancen, så der er overensstemmelse mellem indvindingen (Q), Infiltrationen (I) og det areal (A) hvor vandet infiltrerer ned i magasinet.

Anbefaling:

Det anbefales derfor, at der for referenceoplandet genereres en DXF-fil og tilhørende GIS-fil som tab- eller shape-fil for det pågældende opland, der angiver partikelbanernes strømningsveje (jf. figur 5.3).

Anbefaling:

Det anbefales, at partikelendepunkter genereret i partikelbaneprogrammet, som stammer fra referenceoplandet, gemmes som en simpel dat-fil, der senere kan indlæses i et udvalgt GIS-program til en shape- og TAB-fil. Der vil således let være mulighed for at sammenstille partikelberegningerne med andre relevante hydrogeologiske korttemaer i GIS (jf. afsnit 5.5.2).

Anbefaling:

Det anbefales at der for referenceoplandet udarbejdes GIS-kort som viser, hvor vandpartiklerne i det grundvandsdannende opland infiltrerer jordoverfladen. På det samme GIS-kort skal de infiltrerede vandpartikler vha. en farvelegende illustrere partiklens alder fra grundvandsspejlet og ned til det pågældende indvindingsfilter (jf. afsnit 5.5.3).

Anbefaling:

Det anbefales, at der udarbejdes fordelingskurver med alderen af det infiltrerede grundvand til den pågældende kildeplads, hvor transporttiden fra grundvandsspejlet og ned til indvindingsfilteret er skitseret på x-aksen og den % -vise fordeling samt den kumulative fordeling er angivet på y-aksen (jf. afsnit 5.5.3).

I afsnit 5.5.6 er der givet 2 eksempler på hvordan man kan sammenstille sine data og, hvordan man fastlægger henholdsvis det endelige indvindingsopland og det grundvandsdannende opland ud fra ovenstående anbefalinger (jf. figur 5.8 og figur 5.9 side 69 og side 70).

8. Hvad projektgruppen anbefaler at der arbejdes videre med i 2. del af projektet:

- **Stationære vs. dynamiske modeller, deres fordele og ulemper i forhold til oplandsberegninger**

Baggrund: Det er meget tids- og ressourcekrævende at opstille dynamiske grundvandsmodeller og samtidig kræver det lange tidsserier med mange typer af hydrologiske data. Derfor er det oplagt at stille spørgsmålstegn ved om det er umagen værd at opstille dynamiske modeller, når hovedformålet med modellen er at fastlægge indvindings- og grundvandsdannende oplande.

Formål: Formålet med delprojektet er at få følgende belyst:

- Hvad får vi ud af at opstille en dynamisk model, og kan det betale sig, når man skal anvende modellen til oplandsberegninger?
- Hvor meget mere præcision opnår vi ved at opstille en dynamisk model i forhold til en stationær model?
- Er der områder/geologityper hvor en stationær/dynamisk model er bedst egnet?

Fremgangsmåde: Der laves en vidensopsamling på baggrund af de dynamiske grundvandsmodeller, der er opstillet i forbindelse med grundvandskortlægningen samt litteraturstudie af teori og erfaringer med anvendelse af stationære og dynamiske modeller under forskellige typer hydrogeologiske forhold. Der opstilles på baggrund af litteraturstudiet en række syntetiske modeller for typiske hydrogeologiske forhold i Danmark. Der udarbejdes en matrice bestående af i alt 4 geologityper med varierende geologi og topografiforhold: Hedeslette, Begravet dal, Dødislandskab og Kalkområde (opsprækket). De 4 geologityper underinddeles i stigende geologisk kompleksitet nedefter, med flere overliggende lækagelag med indbygget topografieffekt.

Modellerne simuleres både som stationære og dynamiske modeller, hvor tidsvarierende klima datas betydning for indvindings- og grundvandsdannende oplande vurderes.

- **Test af AEM-metoden (Analytiske element-metode), dets egnethed til udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande.**

Baggrund: Der findes en ny metode på markedet kaldet AEM til beregning af oplande. Metoden betragtes som en "mellemstation" mellem den traditionelle analytiske metode, hvor oplandet tegnes i hånden og den mere avancerede metode, hvor der opstilles en grundvandsmodel til beregning af oplande. Princippet bag AEM er ret simpelt og bygger på superposition af analytiske løsninger. Løsningen findes ud fra summen af effekter fra eksempelvis indvindinger, vandløb, inddelte hydrauliske zoner og grundvandsdannelse. Disse løsninger beregnes på computer, der beregner grundvandspotentialet og herefter indvindingsoplandet.

Endvidere har danske erfaringer med AEM vist, at metoden kan anvendes til at kontrollere geologien og potentialekort. Ved at reducere vores geologiske viden om et område til en simpel konceptuel geologisk model kan vi med AEM efterprøve om vores geologiske forståelse er korrekt. Metoden kan benyttes til at verificere områder, hvor den geologiske model må være mere kompliceret, og hvor yderligere kortlægning derfor kan anbefales. Desuden kan de beregnede potentialekort vise eksistensen af eventuelle sekundære magasiner, hvilket fanges af AEM. Disse to forhold er velegnede i fase 1 kortlægning. Endelig er AEM meget god til at eftervise lokale strømningsforhold ved vandløb og dræn, hvis effekt ofte er udeladt i potentialekortene benyttet til de håndtegnede oplandsberegninger.

Formål: Formålet med delprojektet er at vurdere anvendeligheden og præcisionen af AEM, og om den kan anvendes i forbindelse med grundvandskortlægningen til beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande, og om man kan anbefale metoden i områder, hvor der ikke skal opstilles numeriske grundvandsmodeller.

Fremgangsmåde: Metoden testes på 4 pilotområder, hvor der i forvejen er opstillet numeriske grundvandsmodeller, og hvor oplandene er beregnet på traditionel numerisk vis. Det tilstræbes at der findes 4 modelområder med forskellige geologi og skala så metodens robusthed efterprøves.

Der opstilles på baggrund af de 4 ovenstående modeller 4 semi-syntetiske modeller, hvor disse køres henholdsvis numerisk og med AEM, hvor der heri udføres oplandsberegninger og resultaterne sammenlignes.

Der udarbejdes et litteraturstudie inden for AEM, hvor væsentlige artikler og beskrivelser bliver indarbejdet i delprojektet.

- **Usikkerhedsbetragtninger på numerisk beregnede oplande gennem bl.a. den stokastiske –og andre metoder, -fremgangsmåde, metodik og anbefalinger.**

Baggrund: Stokastiske metoder bliver i stigende grad anvendt af rådgivere til belysning af usikkerheder på beregnede indvindings- og grundvandsdannende oplande. Det er dog langt fra sikkert at denne metode vil give et retvisende billede af de reelle usikkerheder og flere studier af geologisk heterogenitet på oplandsskala antyder også at delelementer i grundvandsmodelleringen som typisk ikke medtages i de stokastiske modellering kan have afgørende indflydelse herpå. Der er i denne forbindelse ikke umiddelbart udarbejdet en udførlig beskrivelse af arbejdsgangen og anbefalede metoder på området. Dette har i flere tilfælde givet anledning til nogen usikkerhed på, hvordan opgaven gribes ordentligt an, både som rådgiver men også som bygherre i forhold til det produkt der skal anvendes i den endelige udpegning af oplandet.

Formål: Formålet med dette delprojekt vil være at få udarbejdet et afsnit i Geo-vejledningen som klart beskriver fremgangsmåder og metoder, man vil anbefale at anvende i forbindelse med usikkerhedsbetragtninger på indvindingsoplande. Det er særligt vigtigt at få belyst hvilke delkomponenter, i en typisk kalibreret grundvandsmodel, som er følsomme i forhold til beregning af indvindingsoplande. Endelig er formålet også klart at få belyst om der bør være forskelle i usikkerhedsbetragtninger i forbindelse med udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande på tværs af landet som følge af forskel relateret til bl.a. magasinforhold, klima, indvindingsforhold og datagrundlag.

Fremgangsmåde: Der udarbejdes et litteraturstudie over hvad der foreligger på området i Danmark og i udlandet. Samtidig inddrages relevante rådgivere som kan bidrage med viden og erfaring på området. Endelig udtages 2 modelområder fra Miljøcentrenes feltområder, hvor den anbefalede fremgangsmåde efterprøves.

9. Appendiks:

9.1 Appendiks A

Beregning af vægtet kildepladspunkt.

$$KP_x = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i x_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} = \frac{Q_1 \times x_1 + Q_2 \times x_2 + Q_3 \times x_3 + \dots}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots}$$

$$KP_y = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i y_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} = \frac{Q_1 \times y_1 + Q_2 \times y_2 + Q_3 \times y_3 + \dots}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots}$$

hvor

KP_x	=	Kildepladspunktets x-koordinat	(UTM x)
KP_y	=	Kildepladspunktets y-koordinat	(UTM y)
Q_i	=	Indvindingsmængden fra boring i	(m ³ /år)
x_i	=	x-koordinat til boring i	(UTM x)
y_i	=	y-koordinat til boring i	(UTM y)
n	=	Antal boringer på kildepladsen	

9.2 Appendiks B

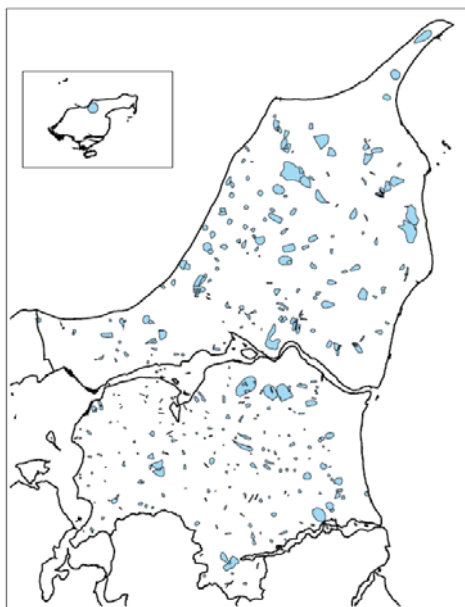
Status for udpegningerne i amterne

9.3 Indledning

Forskellighederne i amternes udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande kan have mange årsager f.eks. befolkningsmæssige, infrastrukturmæssige, erhvervsmæssige og politiske. Forskellighederne i udpegningerne i amterne skyldes også i høj grad det faktum, at Danmarks geologi varierer naturligt fra egn til egn, både med hensyn til, hvilke geologiske aflejringer grundvandsmagasinerne er opbygget af, og hvor forstyrret disse aflejringer er af især istidens gletschere.

I dette kapitel gennemgås amtsvis beregning og udpegninger af indvindings- og grundvandsdannende oplande.

9.4 Nordjyllands Amt



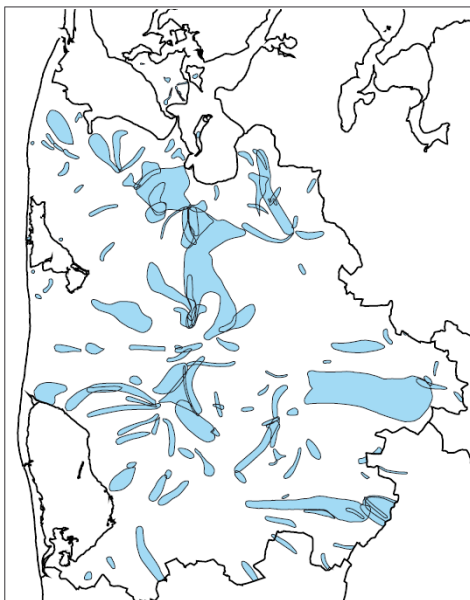
Der er i amtet udviklet et koncept til optegning af indvindingsoplande. Baggrunden er, at vandværkernes indvindingsmængder i mange kortlægningsområder er relativt lille og der er ikke, eller kun i ganske få områder opstillet grundvandsmodeller. I stedet er der fokuseret på at udarbejde et detaljeret potentialekort med større sikkerhed i tolkningen af grundvandets strømningsretninger.

Optegningen af indvindingsoplandene starter med en optegning af et boringsopland for den enkelte indvindingsboring efter en teknisk anvisning. Oplandet rettes til med minimumskrav til afstande omkring boringen og oplandsbredde, eller hvis der er flere boringer, tegnes et samlet opland på baggrund af de enkelte boringers oplande, og et opland for det vægtede kildepladspunkt.

Til indvindingsoplandet hører et Stamblad, der indeholder alle oplysninger, der er relevante for optagningen samt plads til at videregive overvejelser eller beslutninger, der er taget ved optagningen. Stambladet er tænkt som dokumentation for oplandet samt et dynamisk redskab til planlægning af indsamling af bedre viden. Det kan evt. hæftes på indvindingsoplandet i et GIS-værktøj.

Der regnes opholdstider for grundvandet i indvindingsoplandet. Disse tager hensyn til jordbundsforhold og umættet zone og anvendes til at afgrænse en kildepladszone omkring boringerne (Nordjyllands Amt, 2003)

9.5 Ringkøbing Amt:



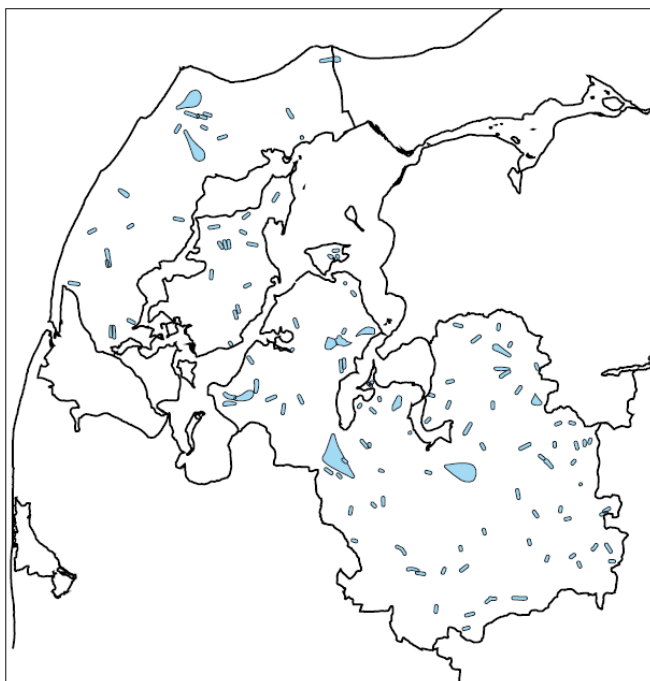
I Ringkøbing Amt har man ikke konsekvent beregnet både indvindings- og grundvandsdannende oplande, men det største areal svarende til indvindingsoplandet er som udgangspunkt angivet.

Der er i forbindelse med detailkortlægningen i flere områder anvendt grundvandsmodeller (GMS og PMWIN/MODFLOW) til at afgrænse indvindings- og grundvandsdannende oplande. Der er udført partikelbaneberegninger, som overvejende er kørt som "backward" kørsler. Der er udelukkende kørt med stationære numeriske modeller i forbindelse med oplandsberegningerne.

I enkelte områder er der forsøgt med stokastiske oplandsberegninger i forbindelse med en usikkerhedsvurdering af de betydende hydrauliske parametre i modellen.

Den analytiske metode er også i et begrænset omfang anvendt på typisk de mindre kildepladser, hvor det af økonomiske årsager ikke har været muligt at opstille numeriske modeller (Miljøcenter Ringkøbing, 2007).

9.6 Viborg Amt



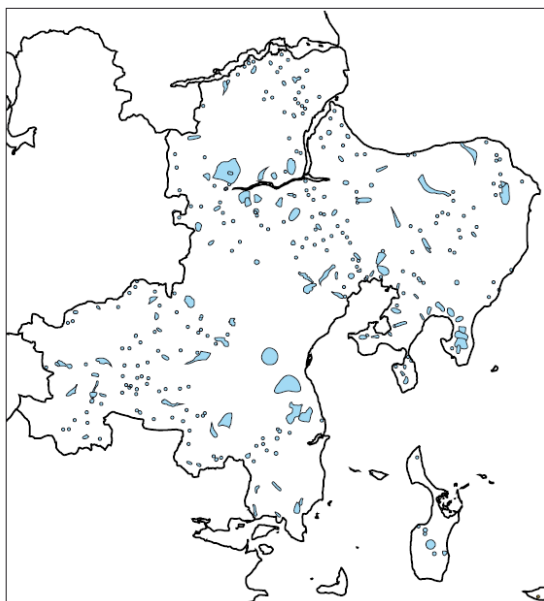
I Viborg Amt har man i forbindelse med detailkortlægningen anvendt grundvandsmodeller til bestemmelse af indvindings- og grundvandsdannende oplande samt til at revidere OSD-afgrænsninger. Der er både arbejdet med stationære og dynamiske modeller opstillet i PMWIN/Modflow og GW-Vistas.

Indvindings- og grundvandsdannende oplande er bestemt ud fra forward og backward partikelbaneberegninger i MODPATH, hvor indvindingen er sat til en skønnet fremtidig indvinding, der typisk er større end eller lig den tilladte indvindingsmængde. Der er således indbygget en vis usikkerhed i beregningerne og plads til en større indvinding i fremtiden.

Man har i amtet opdelt imellem indvindings- og grundvandsdannende oplande og således udført beregninger på begge områder. Inden for de numerisk beregnede grundvandsdannende oplande er partikelaldrene angivet, så der er mulighed for at foretage en zonerings inden for hvert enkelt opland i forbindelse med indsatsplanlægningen (Viborg Amt, 2002).

Endelig er der også arbejdet med stokastiske oplandsberegninger til at belyse usikkerhederne i enkelte oplande, hvor der er varieret i de hydrauliske ledningsevner i de styrende model-lag i grundvandsmodellen. Metoden er dog ikke systematisk anvendt i alle kortlagte områder.

9.7 Århus Amt



I Århus Amt har man i forbindelse med detailkortlægningen både beregnet indvindings- og grundvandsdannende oplande.

I forbindelse med detailkortlægningen er der opstillet grundvandsmodeller i MIKE SHE og PMWIN/MODFLOW. Modellerne er anvendt til at beregne indvindings- og grundvandsdannende oplande ud fra partikelbaneberegninger, som både er kørt "forward" og "backward". Der er anvendt både stationære og dynamiske modeller.

Der har ikke været nogen systematik i forhold til diskretiseringen af grundvandsmodellerne. Generelt har der været kørt med ens cellestørrelse på henholdsvis 100, 200 og 250 meter gridceller over hele modelområdet. Dog har der i en enkelt model været kørt med en finere diskretisering inde omkring større kildepladser.

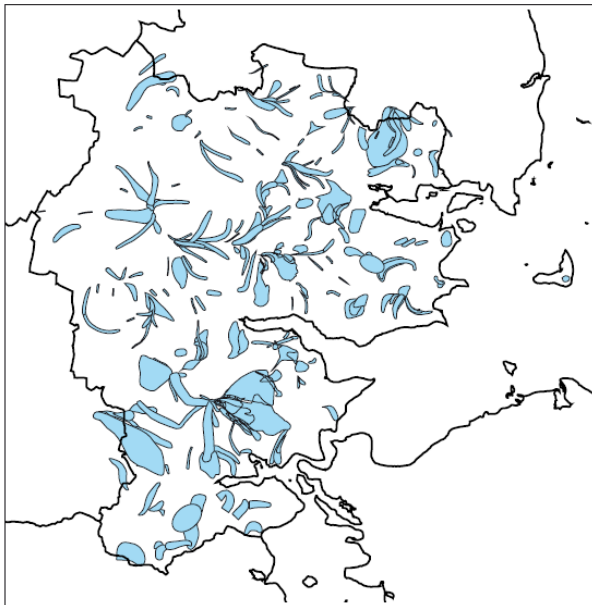
Der er gennemført forskellige scenariekørsler, hvor man har varieret i infiltrationen i forhold til den gennemsnitlige, og man har også varieret i indvindingen for at vurdere, hvilken betydning det havde for oplandets udformning. Amtet har generelt kørt med de aktuelle indvindinger som startinput til modellen, og i nogle modeller lagt den tilladte vandmængde ind som et scenarium. Endelig har amtet været inde og justere i de hydrauliske parametre i de styrende vandførende lag for at se, hvilken effekt det evt. måtte have i forhold til partikelalder og oplandenes udstrækning.

De enkelte partikelbaner er for de fleste grundvandsdannende oplande vist med en legende, som illustrerer alderen på de vandpartikler, der siver ned i jorden det pågældende sted. Endvidere er partikelalderen plottet i et fordelingsplot/histogram, som viser den %-vise fordeling

af alderen på det vand, der udgør det grundvandsdannende opland til den pågældende kildeplads.

Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande til almene vandforsyninger udenfor OSD er foretaget som 300 m zoner. Århus Amt har efterfølgende udpeget oplandene på baggrund af en geologisk vurdering (MTS 1995), som kan ses i et regionsplanstillæg fra 2006 (Århus Amt, 2006).

9.8 Vejle Amt

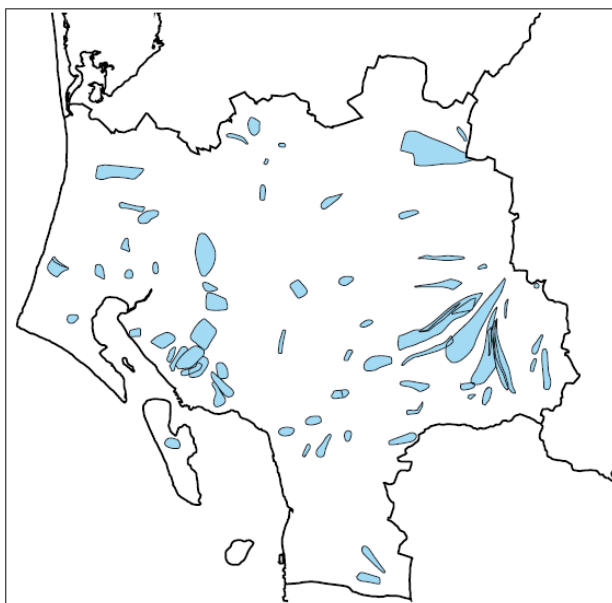


I Vejle Amt har man kun fastlagt indvindingsoplande og således ikke fastlagt de grundvandsdannende oplande (Vejle Amt, 2001).

I hovedparten af indsatsområderne har man anvendt grundvandsmodeller til at fastlægge oplandsgrænserne, og i enkelt områder har man valgt den analytiske metode (MST, 1995). Amtet har opstillet flere grundvandsmodeller i henholdsvis GMS og PMWIN/MODFLOW. Modellerne er anvendt til at udføre partikelbaneberegninger, overvejende som "backward" kørsler til at fastlægge indvindingsoplandene. Modellerne er opstillede som stationære modeller for alle kortlægningsområder.

Der er i flere modeller arbejdet med en diskretisering på 100*100 meter for regionalmodeller og en finere indenfor kildepladsen.

9.9 Ribe Amt:



I Ribe Amt har man i forbindelse med detailkortlægningen inddelt oplandene i henholdsvis indvindings- og grundvandsdannende oplande.

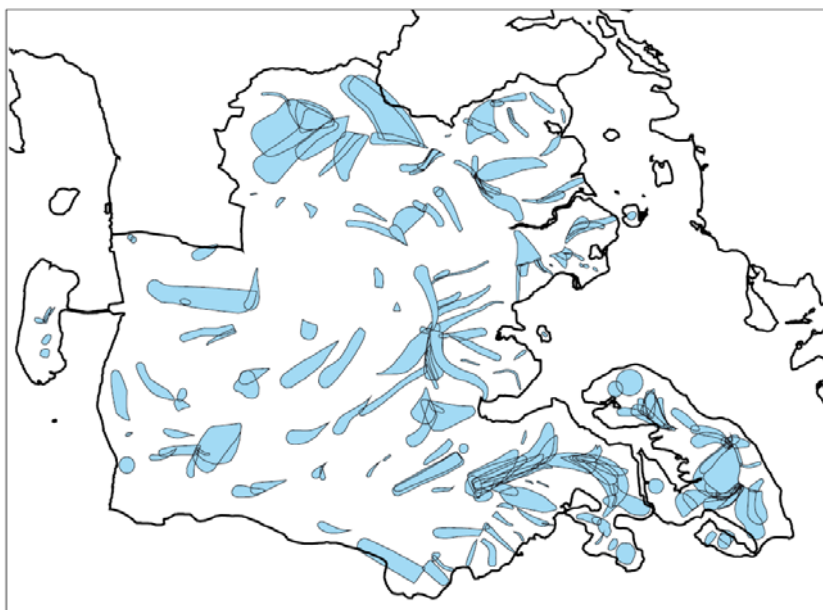
Der er udelukkende anvendt grundvandsmodeller som grundlag for fastlæggelsen af indvindingsoplande. Der er opstillet stationære modeller i henholdsvis GMS og PMWIN/MODFLOW samt GMS i de regionale modeller.

Som et led i usikkerhedsbetragtningerne har man udført modelkørsler, hvor man har varieret på grundvandsdannelsen i forhold til udgangssituationen med henholdsvis 25 % og -30 %. Samtidig har man udført stokastiske oplandsberegninger på samtlige oplande, hvor usikkerheden på relevante parametre er efterprøvet. De 3 forskellige scenarier fremkommet ud fra variationen i infiltrationen er sammenholdt med oplandene fra de stokastiske oplande, og man har således fastlagt et totalopland for henholdsvis indvindings- og det grundvandsdannende opland.

Da indvindings- og grundvandsdannende oplande bestemmes ud fra de 4 ovenstående scenarier, er de fleste oplande arealmæssigt større i forhold til den indvinding, der ligger til grund for den samlede oplandsbestemmelse. Indvindingen er i de simulerede boringer sat til den tilladte vandmængde og fastholdt i alle scenarier.

De beregnede partikelaldre, som alle er beregnet ud fra "backward" partikelbaneberegninger, er sammenstillet som 100, 200 og <200 års oplande for samtlige kildepladser. Partikelaldrene er anvendt i forbindelse med den videre indsatsplanlægning /1/.

9.10 Sønderjyllands Amt



I Sønderjyllands Amt er der i forbindelse med detailkortlægningen ikke skelnet imellem indvindings- og grundvandsdannende oplande, men kun udarbejdet indvindingsoplande.

I alle kortlægningsområder er anvendt grundvandsmodeller (GMS, Visual-MODFLOW og PMWIN/MODFLOW) til at bestemme indvindingsoplande i partikelbaneprogrammet MODPATH. Partikelsimuleringerne er både kørt "forward og backward".

Der er opstillet både stationære og dynamiske modeller, men modellerne er kørt som stationære i forbindelse med partikelbaneberegningerne.

Der er opstillet regionale modeller med en cellestørrelse på 200-250 meter, som er forfinet ned til 25 meter inde omkring vigtige kildepladser. Der findes således mindre kildepladser, hvor oplandene er beregnet ud fra den grovere diskretisering i modellen

I modellerne har man valgt at anvende den faktiske indvindingsmængde i m³/år i forbindelse med scenarieberegninger.

De beregnede partikelaldre for de enkelte oplande er anvendt til at skitsere henholdsvis 10, 30, 60 årsoplande, og de resterende partikler regnes helt tilbage til grundvandsskellet i uendelig tid.

Der er ikke udarbejdet analytiske oplande i forbindelse med detailkortlægningen, men i forbindelse med regionplantemaerne for 2001 findes der oplande, som er udarbejdet efter den analytiske metode efter Miljøstyrelsen 1995.

9.11 Fyns Amt



I Fyns Amt blev indvindingsoplande i første omgang optegnet ud fra de analytiske retningslinjer beskrevet i Miljøstyrelsens vejledning. Mange af oplandene var langstrakte i deres udformning og den bagerste del af oplandet var ofte usikkert bestemt. Det blev besluttet at offentliggøre en version "nærmeste indvindingsopland", hvor kun den borigsnære del af oplandet blev vist. Det var en åben version, der gav et signal om at, der fra den åbne ende kunne strømme vand ind i indvindingsoplandet fra et større område opstrøms.

I versionen nærmeste opland blev der inkluderet en ekstra zone til siderne, for at imødekomme den usikkerhed, der var på de parametre der indgik i beregningerne, samt usikkerhed i strømningsretning. Siderne på "det nærmeste opland" blev trukket så langt tilbage i oplandet, at det kunne formodes, at det åbne opland var stort nok til at levere en grundvandsdannelse svarende til indvindingstilladelsen.

I forbindelse med gebyrkortlægningen blev der forbedret på udpegningen af indvindingsoplande. Hertil kommer, at der blev beregnet på grundvandsdannende oplande.

Oplandene er beregnet ud fra numeriske grundvandsmodeller, som delvis har taget udgangspunkt i DK-modellen som randbetingelse. Modellerne er overvejende opstillet i MIKE SHE, men der er også opstillet enkelte modeller i PMWIN/MODFLOW. Modellerne er anvendt til at beregne indvindings- og grundvandsdannende oplande ud fra partikelbaneberegninger, som er kørt "forward" ved afvendelse af MIKE SHE modeller, eller backward med MODFLOW. Der er anvendt både stationære og dynamiske modeller til oplandsberegningerne.

I Modellerne er der kørt med en celle diskretisering på 250*250 meter grids i interesseområderne og 125 i indsatsområderne.

De beregnede vandpartikler, som udgør det grundvandsdannende opland til de enkelte kildepladser, er illustreret med deres alder fra 0-50 år.

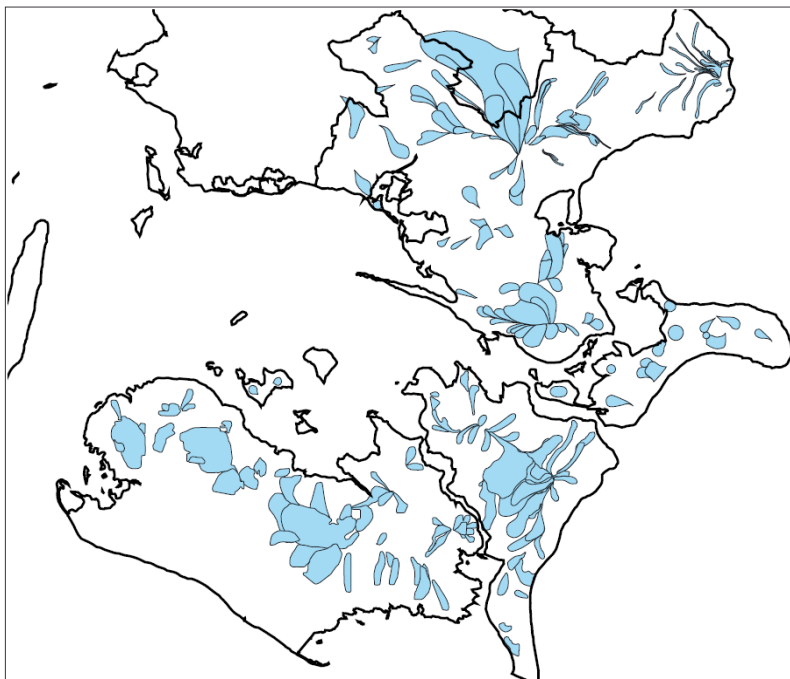
Der er kørt med både den tilladte og den faktiske indvinding i forbindelse med scenarieberegningerne samt forskellige andre scenarier.

Man har også i udvalgte oplande forsøgt sig med at bestemme stokastiske oplande, hvor usikkerhederne på udvalgte parametre er efterprøvet.

9.12 Vestsjællands Amt

GEUS mangler at få en tilbagemelding fra medarbejdere i det tidligere Vestsjællands Amt.

9.13 Storstrøms Amt



I Storstrøms Amt har man i forbindelse med detailkortlægningen inddelt oplandene i henholdsvis indvindings- og grundvandsdannende oplande for de områder, hvor der er opstillet grundvandsmodeller (Storstrøms Amt, 2005).

I enkelte områder er indvindingsoplandene optegnet som analytiske oplande på baggrund af Miljøstyrelsens vejledning fra 1995 (MST, 1995).

Der er opstillet 2 større regionale modeller i MIKE SHE, som er kørt dynamiske. Modellerne er anvendt til at udføre "forward" partikelbaneberegninger, som har kunnet fastlægge de grundvandsdannende oplande.

Der er kørt med en ens diskretisering i hele modelområdet for hver af de 2 regionale modeller, hvor der i den ene er kørt med en celledimension på 500*500 meter, og i en anden model har man valgt en noget finere opløsning på 100*100 meter.

I Storstrøms Amt er det valgt at sætte indvindingen i modelberegningerne til værdien i indvindingstilladelsen, hvilket typisk er større end den aktuelle indvinding pr. år. Der er således indbygget en vis usikkerhed i oplandsberegningerne og plads til en større indvinding i fremtiden.

Partikelbanerne er typisk beregnet helt fra grundvandsskel og ind til den pågældende indvindingsboring. Partikelaldrene er ikke tematiseret med alder eller opgjort på andre årsintervaller.

9.14 Roskilde Amt

Der foreligger ikke et GIS-tema over indvindingsoplande for Roskilde Amt.

I Roskilde Amt har man i forbindelse med detailkortlægningen inddelt oplandene i henholdsvis indvindings- og grundvandsdannende oplande for de områder, hvor der er opstillet grundvandsmodeller.

Der er opstillet én model i MODFLOW som dækker hele amtet og indeholder 5 beregningslag. Modellen er stationært kalibreret men med dynamiske input data. Der er kørt med ens diskretisering i hele modelområdet svarende til 200*200 meter. Modellen er anvendt til at udføre partikelbaneberegninger, som har kunnet fastlægge de indvindings- og grundvandsdannende oplande. Der er udført partikelbaneberegninger på de 50 største kildepladser i amtet. På de øvrige kildepladser er oplandene fastlagt ud fra den analytiske metode på baggrund af Miljøstyrelsens vejledning fra 1995 (MST, 1995).

I Roskilde Amt har man valgt at køre med forskellige scenarier, hvor man har forsøgt at variere på henholdsvis nettonedbøren og indvindingen i modellen.

Der er udført scenarier, hvor der er varieret i indvindingens størrelse. Der er kørt med den gennemsnitlige faktiske indvundne vandmængde og 2 scenarier med henholdsvis mindste og største faktiske indvundne vandmængde. Endelig er der mht. nettonedbøren kørt et scenarie med henholdsvis den gennemsnitlige nettonedbør, et med det tørreste og et scenarie med det vådeste år. Det endelige indvindings- og grundvandsdannede opland er fastlagt ud fra, hvilke beregningsceller der i modellen oftest leverer partikler til en given kildeplads. Hvis f.eks. en modelcelle leverer partikler til en kildeplads i alle scenarieberegninger udgør cellen en af de mest sikre udpegede dele af oplandet.

9.15 Frederiksborg Amt



I Frederiksborg Amt har man både beregnet indvindings- og grundvandsdannende oplande i forbindelse med detailkortlægningen.

Der blev udarbejdet analytiske oplande for alle vandværker i 1995. Dette blev gjort på baggrund af Theis (Frederiksborg Amt, 1995).

For alle vandværker er der tilbage i midten af 90'erne beregnet analytiske indvindingsoplande. Disse oplande er løbene blevet erstattet med modelberegnete oplande i indsatsområderne efterhånden som kortlægningen er skredet frem. De modelberegnete oplande er ind delt i henholdsvis indvinding- og grundvandsdannende oplande. På amtets officielle GIS-tema over invindingsoplande er der dog vist det samlede opland.

Modelkonceptet har ikke været statisk men har udviklet sig løbene. Indvindingsoplandene er primært optegnet på baggrund af stationære modflow-modeller (GMS, Visual Modflow). I de senere år gik man over til dynamiske MIKE SHE modeller.

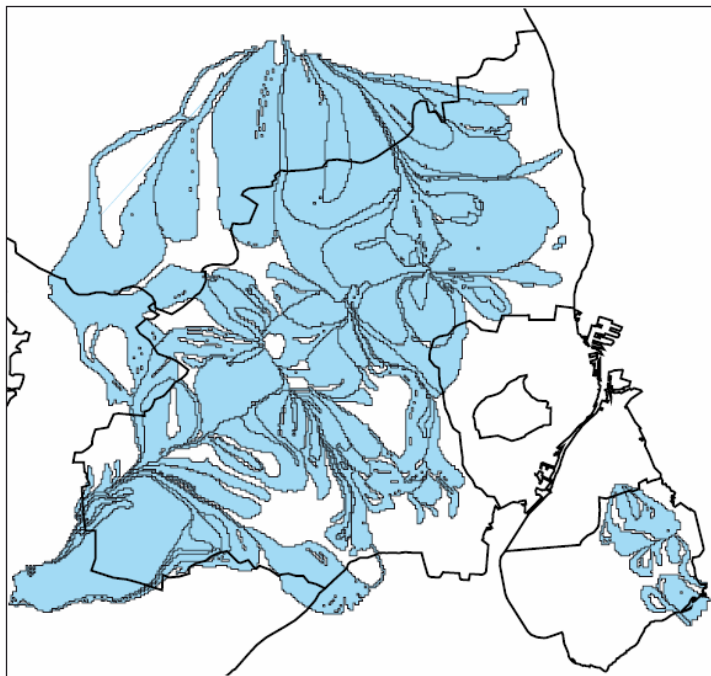
Amtets regionale model er opstillet i et 250 meter grid mens detailmodeller er opstillet i et grid på 100-125 meter. I enkelte modeller er gridstørrelsen varieret indenfor området.

Som et led usikkerhedsanalysen har amtet i flere modeller varieret infiltrationen +25% eller -25% i forhold til udgangssituationen.

Der er overvejende kørt med den gennemsnitlige faktiske indvinding over de sidste 10 år. Da denne har været faldene igennem en årrække er der herved indbygget en vis reserve.

Amtet har på næsten 100 % af de modelberegnete oplande udført stokastiske oplandsberegninger, hvor usikkerheden på relevante parametre er efterprøvet.

9.16 Københavns Amt



I Københavns Amt har man i forbindelse med detailkortlægningen inddelt oplandene i henholdsvis indvindings- og grundvandsdannende oplande.

Indvindingsoplandene i Københavns Amt er overvejende udpeget ved hjælp af grundvandsmodeller, hvor den regionale Amtsgrundvandsmodel (KAM-modellen) er anvendt til at udføre beregningerne for henholdsvis indvindings- og grundvandsdannende oplande. KAM-grundvandsmodellen er kalibreret som en stationær model.

Der gælder helt specielle forhold omkring oplandenes størrelse og udbredelse i Københavns Amt. Dette skyldes den store indvinding, som gør at hele amtet stort set er dækket af overlappende oplande.

Der er udført oplandsberegninger, hvor der er lagt henholdsvis $\pm 20\%$ på nedbøren og på indvindingen som et led i usikkerhedsvurderingerne på de enkelte oplande.

9.17 Bornholms Amtskommune

Der foreligger ikke et GIS-tema over indvindingsoplande for Bornholms Amt.

Til beregning af indvindingsoplande i forbindelse med detailkortlægningen har Bornholms Regionskommune anvendt den numeriske grundvandsmodel "DK-model for Bornholm", som er opstillet af GEUS i MIKE-SHE.

Der er udført partikelbaneberegninger i MIKE-SHE's partikelbanemodel, hvor beregningerne er udført som "foreward" kørsler (Niras, 2006).

10. Litteraturliste:

Anderson, M.P. og Woessner, W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling – Simulation of Flow and Advective Transport, p. 21.

Bai, W. & Kærgaard H., 1982. Fysisk hydrologi, Placering og dimensionering af kildeplads & Noget om følgevirkninger af grundvandsindvinding. Laboratoriet for Geoteknik, Ingeniørhøjskolen Horsens Teknikum.

Bai, W., 1990. Stationær og ikke stationær grundvandsstrømning, Laboratoriet for Geoteknik, Ingeniørhøjskolen, Horsens teknikum.

Bear, J., 1979. Hydraulics of Groundwater. Department of Civil Engineering. Technion Isreal Institute of Technology. Haifa, Israel, pp. 1-569.

Bhatt K., 1993. Uncertainty in wellhead protection area delineation due to uncertainty in aquifer parameter values. J. Hydrology, p. 149, 1-8.

Christensen, S., 1995. Grundvandsmodellering. I: Nielsen, O.B., (red.) Danmarks geologi fra Kridt til i dag. Geologisk Institut, Århus Universitet, pp. 193-215.

Christensen, S., 1998. Grundvandsmodellers usikkerhed – kvantificering af grundvandsmodellers usikkerhed. Geologisk Nyt nr. 2, 1998.

Craig, J., 2002. University of Buffalo, Bluebird developer manual, 51 p.

Frederiksborg Amt, 1995: Vandindvindingsoplande i Frederiksborg Amt.

Frind, E.O., Muhammad, D.S. and Molson, J.W., 2002, Delineation af Three-Dimensional Capture Zones for Complex Multi-Aquifer Systems, Ground Water, Vol. 40: 586-598.

Jørgensen, F., Margrethe K., Højbjerg, A., L., Klint, K., E., Hansen, C., Jordt, B., E. Richard, N. Sandersen, P., GEUS, (2008), Geo-vejledning, Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering.

Harrar, G. W., Sonnenborg T.O. og Henriksen, H.J., 2003, Capture zone, travel time, and solute-transport predictions using inverse modelling and different geological models. Hydrology Journal, vol. 11: 536-548.

Henriksen, J., Rasmussen, P. og Knudby, C., GEUS, Afprøvning af zoneringsmetoder, Miljøprojekt Nr. 553 2000, Miljøstyrelsen, 2000.

Hunt, R.J., 2006. " Ground Water Modeling Application Using the Analytic Element Method, Ground Water-Januray-February, Vol. 44, No.1, pp. 5-15pp.

Københavns Amt, & Madsen, B., 2004. "Vandindvindingens påvirkning af vandløb, søer og vådområder", Københavns Amt, Teknisk Forvaltning, Jord- og Vandafdelingen, i samarbejde med Water Vision a/s).

Miljøstyrelsen, 1995: Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen Nr.8 1995 "metoder til udpegning af indvindingsoplande".

Miljøstyrelsen, 2000. Vejledning nr. 3 2000, Zonering. Miljøstyrelsen, Miljø- og energiministeriet.

Miljøstyrelsen, 2007. Boringsnære beskyttelsesområder – BNBO. Vejledning fra Miljøstyrelsen. BNBO. Appendiks 2.

Nielsen, M. R., 2008. Status for anvendelse af MRS (Magnetisk Resonans Sondering) i Danmark. ATV jord og Grundvand Vintermøde 2008.

Nordjyllands Amt, 2003, Vejledning til indvindingsoplande, Maj 2003.

Reilly, Thomas E. og David W. Pollock, 1993: Factors Affecting Areas Contributing Recharge to Wells in Shallow Aquifers. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2412.

Ribe Amt, Grundvandskontoret, 2006, Stationær grundvandsmodel, Område 1-10 med fokus på Grindsted og Løvlund OSD.

Sonnenborg, T. O. & Henriksen H. J. 2005: Håndbog i grundvandsmodellering, GEUS, 2005.

Storstrøms Amt, 2005. Regionplan 2005-2017.

Vejle Amt, Regionplanen, 2001, Amdsrådet og Grundvandet.

Viborg Amt, 2002, Beskyttelse af grundvandet i Tillæg nr. 17 til Regionplan 2000-2012.

Zheng C. (1992): Analysis of Particle Tracking Errors Associated with Spatial Discretization. Ground Water, Vol. 32, No.5, pp. 821-828, 8pp.

Århus Amt, 2006. Tillæg til regionplan 2005. Udpegning af indvindingsoplande.



GEO-VEJLEDNING 2 **UDPEGNING AF INDVINDINGS- OG GRUNDVANDSDANNENDE OPLANDE (DEL 1)**

Som støtte for den nationale grundvandskortlægning udarbejder GEUS i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsen og miljøcentrene faglige vejledninger i forskellige aspekter af grundvandskortlægningen.

Disse vejledninger udgives i en serie kaldet Geo-Vejledninger, og skal blandt andet tjene som fagligt grundlag for de udbud af kortlægningsopgaver som miljøcentrene foretager.

Nærværende Geo-Vejledning sammenfatter de erfaringer med udpegning af oplande som er gjort i amterne og beskriver en fremgangsmåde til udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande, som fremadrettet kan benyttes i forbindelse med den nationale grundvandskortlægning. Det er formålet med denne Geo-Vejledning, at udarbejdelsen af indvindings- og grundvandsdannende oplande sker på en klar og ensartet måde i hele landet.