

Miljøprojekt Nr. 553 2000

Afprøvning af zoneringsmetoder

Hans Jørgen Henriksen, Per Rasmussen og Christen Knudby

Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

Forord	5
Sammenfatning og konklusion	7
1 INDLEDNING	9
1.1 BAGGRUND	9
1.2 FORMÅL	10
1.3 RAPPORTENS INDHOLD	10
2 FORUDSÆTNINGER OG AFGRÆNSNINGER	11
2.1 FORUDSÆTNING FOR RAPPORT	11
2.1.1 Drikkevandsudvalgets betænkning	11
2.1.2 Formål med zonerings	12
2.2 AFGRÆNSNING AF RAPPORT	12
2.3 UDGANGSPUNKTET FOR ZONERINGEN ER REGIONPLAN 1997	13
3 OPSTILLING AF EN HYDROGEOLOGISK TOLKNINGSMODEL	16
3.1 DEFINITION OG ANTAGELSER	16
3.2 TYPEOMRÅDER	16
3.3 HYDROGEOLOGISK TOLKNING	17
3.3.1 Lertykkelseskort	18
3.3.2 Sprækker og sandvinduer	20
3.3.3 Kortlægning af glacialtektonisk variabilitet	20
3.3.4 Opstilling af geokemisk model til vurdering af pesticidudbredelse i grundvand	21
3.3.5 Vurdering af nitratudbredelse	21
3.4 KONKLUSION	22
4 ZONERINGSMETODER	23
4.1 VURDERING AF ZONERINGSMETODER	23
4.1.1 nitratfølsomme områder	23
4.1.2 pesticidfølsomme områder	23
4.1.3 behov for ensartede metoder	24
4.2 GENERELLE FORHOLD OMKRING DATAINPUT TIL TEMAKORT	25
4.2.1 Generelle forhold omkring datainput til temakort	25
4.2.2 Generelle forhold omkring datainput til grundvandsmodeller	25
4.3 GRUNDVANDETS TRYKFORHOLD	25
4.3.1 Temakortbaseret	26
4.3.2 Modelbaseret	27
4.3.3 Diskussion "Grundvandets trykforhold"	27
4.4 TRANSPORTTID	27
4.4.1 Temakortbaseret	28
4.4.2 Modelbaseret	29
4.4.3 Diskussion "Transporttid gennem dæklag; inert stof"	29
4.5 SIMPLE STOFSPESIFIKKE FORHOLD	29
4.5.1 Temakortbaseret	30
4.5.2 Modelbaseret	30
4.5.3 Diskussion af 'simple stofspecifikke forhold'	30
4.6 SORPTION / NEDBRYDNING, DENSITETSSTRØMNING	31
4.6.1 Temakortbaseret	31
4.6.2 Modelbaseret	31
4.6.3 Diskussion af 'sorption og nedbrydning'	31
4.7 KONKLUSION VEDRØRENDE ZONERINGSMETODER	31

5	AFGRÆNSNING AF INDVINDINGSOPLANDE OG INFILTRATIONSOMRÅDER	33
5.1	AFGRÆNSNING AF INDVINDINGSOPLANDET I DET FILTERSATTE MAGASIN	34
5.1.1	<i>Værktøjer til afgrænsning af IDFM</i>	35
5.2	OPHOLDSTID I GRUNDVANDSMAGASINET	35
5.2.1	<i>MIKE SHE partikelbanemodul</i>	35
5.2.2	<i>MODPATH partikelbanemodul</i>	36
5.2.3	<i>Begrænsninger ved numeriske modeller</i>	36
5.2.4	<i>Diskussion af partikelbanesimuleringer</i>	37
6	STOKASTISKE METODER	40
6.1	METODIK	40
6.2	VURDERING	40
7	AFPRØVNING AF ZONERINGSPRINCIPPER, SIMPLE OG AVANCEREDE METODER	41
7.1	INTRODUKTION TIL AFPRØVNING AF METODER	41
7.1.1	<i>Valg af primært magasin</i>	41
7.1.2	<i>Ensartet præsentation af resultater</i>	42
7.1.3	<i>Lertykkelseskort, infiltrationsområder og indvindingsoplande</i>	42
7.1.4	<i>Partikelbanesimuleringer</i>	43
7.1.5	<i>Diskussion af zoneringsprincipper</i>	43
7.2	ØSTFYN-OMRÅDET	43
7.2.1	<i>Kort beskrivelse af området</i>	43
7.2.2	<i>Resultater for Østfyn</i>	44
7.2.3	<i>Diskussion af zoneringsprincipper for Østfyn</i>	46
7.3	EJSTRUPHOLM-OMRÅDET	47
7.3.1	<i>Kort beskrivelse af området</i>	47
7.3.2	<i>Resultater for Ejstrupholm</i>	47
7.3.3	<i>Diskussion af zoneringsprincipper for Ejstrupholm</i>	50
7.4	SNEUM Å OMRÅDET	50
7.4.1	<i>Kort beskrivelse af området</i>	50
7.4.2	<i>Resultater for Sneum å området</i>	51
7.4.3	<i>Diskussion af resultater for Sneum å</i>	53
7.5	SAMMENSTILLING AF RESULTATER FRA DE 3 OMRÅDER	54
7.6	LERTYKKELSESKORT	54
7.7	AFGRÆNSNING AF INFILTRATIONSOMRÅDER OG INDVINDINGSOPLANDE TIL VANDVÆRKER	55
7.7.1	<i>Partikelbanesimuleringer for Østfyn området</i>	55
7.7.2	<i>Partikelbanesimuleringer for Ejstrupholm</i>	57
7.7.3	<i>Partikelbanesimuleringer for Sydvestjylland</i>	62
7.8	KONSEKVENNS AF FORØGET VANDINDVINDING	62
8	OPSAMLING OM SIMPLE KONTRA AVANCEREDE VÆRKTØJER	64
8.1	METODEVALG	64
8.2	DISKUSSION AF DISKRETISERING	65
8.3	KOMBINATION AF METODER	65
9	KONKLUSION	67
10	REFERENCER	69

Appendix 1 Forudsætninger for beregning af transporttid ved stempelstrømningsmodel

Forord

Dette projekt er udført af Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse for Miljøstyrelsen i 1998.

Projektet er udført med henblik på at sammenligne forskellige metoder til afgrænsning af områder hvor grundvandsmagasinerne er dårligt beskyttede mod nedtrængningen af forureninger fra overfladen. Projektet er udført sideløbende med udarbejdelsen af en vejledning i zonerings.

“Everything must be made as simple as possible, but not simpler”. Albert Einstein

Sammenfatning og konklusion

Zoneringen

Zoneringen af grundvandsoplande bygger videre på den kortlægning af grundvandsmagasinernes naturlige beskyttelse som er gennemført i forbindelse Regionplan '97. I denne kortlægning er anvendt 3 beskyttelsesklasser: *God beskyttelse*, *nogen beskyttelse* og *ringe/ingen beskyttelse*, som gennemføres både med en generel vurdering og med en stofspecifik vurdering. Områder hvor grundvandsmagasinet er klassificeret med *nogen* beskyttelse eller *ringe/ingen* beskyttelse betegnes efterfølgende *sårbarhedszoner*. Inden for disse zoner er der derfor behov for en særlig indsats, såfremt man ønsker at opretholde eller forbedre grundvandskvaliteten, idet den naturlige beskyttelse og de generelle beskyttelsestiltag anses for utilstrækkelige.

Det første skridt i forbindelse med afgrænsning og udpegning af beskyttelseszoner i et område er opstilling af en hydrogeologisk tolkningsmodel for området. En hydrogeologisk tolkningsmodel er en hypotese for hvordan det hydrogeologiske system er opbygget og hvordan de hydrologiske processer forløber og samvirker. De overordnede elementer i en hydrogeologisk tolkningsmodel udgøres af den geologiske ramme, grundvandets tryk- og strømningforhold samt vandbalancen.

Lerlag og beskyttelse

Omkring 40 % af Danmarks areal består af moræneler inden for de øverste meter af jordlagene. Morænelerets tykkelse, sammensætning og strukturer har stor betydning for nedsivningsforholdene. Ved de seneste års sårbarhedskortlægning i amterne har nogle af de vigtigste parametre for at klassificere grundvandsmagasinernes sårbarhed været lertykkelse og lerudbredelse, som især er et brugbart koncept når det gælder en vurdering af sårbarheden i forhold til nitrat.

Inden for de seneste år er det imidlertid dokumenteret at morænelerslag med tykkelser på 5-8 meter er gennemskåret af lodrette sprækker, som er dannet under istiden. Sprækkerne virker som transportveje hvor forurenende stoffer på jordoverfladen hurtigt kan sive ned i grundvandet med nedbøren (præferentiel strømning). I tykkere lerlag på mere end 10 meter vil betydningen af lodrette sprækker antagelig være mindre, uden at dette er en garanti for at de ikke forekommer og kan være betydningsfulde for transport af stoffer. Sprækkerne betyder desuden at væsentlig forurening i lerlagene kan smitte af på det nye vand, som strømmer forbi i sprækkerne. Mulighederne for præferentiel strømning i ler er en nøgleparameter når det gælder en nærmere vurdering af sårbarheden i forhold til miljøfremmede stoffer, som f.eks. pesticider.

I visse områder med moræneler kan der desuden være områder hvor lerlaget er tyndt eller fraværende (sandvinduer). Kendskab til sandvinduer er nødvendig i forbindelse med zonerig på grund af stor grundvandsdannelse. Sandvinduer og sprækker kan kun kortlægges ved detaljerede og omkostningskrævende undersøgelsesmetoder, omfattende bl.a. borerig og gravninger, hvorimod geofysiske overflademeter her ikke er tilstrækkelige.

Pålideligheden af zonerig er i høj grad afhængig af hvorvidt lagene ligger uforstyrrede eller ej, dvs. afhængige af den glacialtektoniske variabilitet. Parametre til bestemmelse af glacialtektonisk variabilitetsgrad består af: overfladegeologi, morfologi, prækvartæroverfladens morfologi, boringsoplysninger, kystkliner og råstofgrave. Arealer med uforstyrret dække består bl.a. af senglaciale eller postglaciale smeltevandsaflejringer, ferksvandsaflejringer og marine aflejringer. Morfologisk veldefinerede glacialtektoniske komplekser består

bl.a. af randmorænebakker og lignende. Desuden kan dybe dale og markante højdedrag i prækvartæroverfladen, kote og tykkelse af geologiske enheder samt flager registreret i boringer give input til en glacialtektonisk tolkning.

Ved vurdering af sorption og nedbrydning foretages en stofs specifik vurdering af omsætning og tilbageholdelse af forurening under strømning gennem jordlag fra terræn til grundvandsmagasinet. Ved vurdering af et områdes følsomhed med hensyn til f.eks. pesticider indgår, ud over en vurdering af de hydrauliske forhold og mulighederne for præferentiel strømning, en række geokemiske forhold som skal belyses: bl.a. stofs specifikke sorptions- og nedbrydningsparametre, som f.eks. organisk stof, forsuringsgrad/kalkindhold og redoxforhold. Vurderinger af stofs specifik beskyttelse med hensyn til nitrat omfatter bl.a. redoxforhold, methan og pyritholdige jordlag. Visse oplysninger kan hentes fra boredata, bl.a. lagfølge, kalkindhold og dermed forsuringsfront, redoxfronten ud fra farvebeskrivelser af boringer, men såfremt der skal gennemføres en nærmere stofs specifik beskyttelsesvurdering forudsættes indsamling af yderligere data (boringer, sprækkeudbredelse, vandprøver, jordprøver) samt laboratoriemålinger (organisk stof, kemiske analyser) og -forsøg (sorption og nedbrydning) på udvalgte prøver.

Principper for zonerings

Den praktiske afgrænsning af sårbarhedszoner kan bestå af forskellige elementer:

- 1) Areal distribueret nedsivning,
- 2) Infiltrations- og udstrømningsområder (gradientforhold),
- 3) Transporttid gennem dæklag,
- 4) Simple stofs specifikke forhold (f.eks. aerob/anerob),
- 5) Sorption og nedbrydning og
- 6) Afgrænsning af indvindingsoplandet og tilhørende infiltrationsområder samt opholdstiden.

Sidstnævnte element har særlig stor betydning for vandværker beliggende uden for områder med særlige drikkevandsinteresser.

Areal distribueret grundvandsdannelse

Områder med infiltration og udstrømning kan vurderes ud fra temakort eller ud fra pejlinger. En areal distribueret grundvandsdannelse og beliggenhed af nedsivnings- og udstrømningsområder kan bestemmes ved aldersdatering (CFC) af grundvand eller vurderes ved hjælp af grundvandsmodeller, på baggrund af et bredt datagrundlag i form af nedbør, fordampning, jordbundsforhold, hydrauliske parametre, grundvandspejlinger og afstrømningsmålinger. Simple metoder kan primært beskrive grundvandsdannelsen til det øverste magasin midlet over større områder, f.eks. på baggrund af data for medianminimumsafstrømning i vandløb, eksisterende oppumpning eller kendskab til nettonedbøren. 3D-modeller kan give en mere detaljeret vurdering af den areal distribuerede grundvandsdannelse til såvel øvre som dybere beliggende magasiner.

Perkolationstid

Transporttiden gennem dæklag for et inert stof (konservativt stof) kan simpelt bestemmes ved hjælp af "stempelstrømningsmetoden". Input til metoden består af værdier for infiltration (nettonedbør), vandindhold/ markkapacitet i umættet zone, effektiv porøsitet og tykkelse af geologiske lag. Brugen af begrebet perkolationstid skal understrege at der er tale om midlede transporttider. Der kan derfor være en betydelig spredning på transporttiden som følge af præferentiel strømning, sprækker, vinduer og udveksling med matrix. Perkolationstiden tager imidlertid ikke hensyn til horisontale strømningskomponenter og giver dermed et relativt tilnærmet billede af de faktiske forhold. Perkolationstiden kan også bestemmes på baggrund af en grundvandsmodel ud fra beregnede strømningshastigheder og en skønnet porøsitet for de enkelte lag. En sådan bestemmelse giver en mere præcis beskrivelse af

nedtrængningshastigheden af grundvandet i dybere grundvandsmagasiner, men en korrekt hensyntagen til den horisontale strømning forudsætter en 3D partikelbanemodellering. Metoden er derfor kun brugbar under meget simple magasinforhold.

3D partikelbane model

Med 3D partikelbane model kan der foretages en analyse af indvindingsoplande og infiltrationsområder til de enkelte vandværkers kildepladser samt foretages vurdering af opholdstider (grundvandets alder) i forskellige grundvandsniveauer og lokaliteter. Følsomheden af afgrænsningen af infiltrationsområder tilhørende de respektive indvindingsoplande / kildepladser kan desuden analyseres under hensyn til ændringer i klima, indvindingsstruktur og usikkerhed på parameterverdier. Brugen af 3D-modeller vurderes i de fleste tilfælde nødvendig idet simple metoder giver meget usikre resultater.

Simple stofspecifikke forhold

Simple stofspecifikke forhold i dæklag kan vurderes med udgangspunkt i temakort eller geokemisk kortlægning. Advektion, dispersion, sorption og nedbrydning kan modelleres med et stoftransportmodul i 3D. Modeller til simulering af nitrattransport findes, hvor procesforståelsen er implementeret.

Når det gælder pesticider, forventes den konceptuelle forståelse af pesticidtransporten i jord- og grundvand først opbygget i forbindelse med Det Strategiske Miljøforskningsprogram (SMP 96) som omhandler pesticider og grundvand. Modelværktøjer findes, men en nærmere afprøvning og test for danske hydrogeologiske forhold er i gang, og modellerne forventes først delvis operationelle om 3-5 år. Anvendelsen af modelværktøjer er ikke begrænset af manglende software og modelkoder, men derimod af det betydelige datakrav som sådanne stoftransport modelopstillinger forudsætter, og som normalt ikke kan honoreres ud fra eksisterende data.

Tre områder til afprøvning

For tre udvalgte områder: Østfyn omkring Nyborg, Midtjylland omkring Ejstrupholm og Sydvestjylland omkring Sneum å-oplandet er der udarbejdet eksempler på karakterisering af grundvandets sårbarhed baseret på henholdsvis simple temakortbaserede metoder og metoder understøttet af avancerede 3D-grundvandsmodeller.

For hvert eksempel er simple metoder sammenlignet med resultater af 3D-modelberegning til vurdering af

- 1) arealdistribueret grundvandsdannelse,
- 2) afgrænsning af indvindingsoplande og tilhørende infiltrationsområder til større kildepladser,
- 3) infiltrations- og udstrømningsområder (gradientforhold) og
- 4) transporttid gennem dæklag (perkolationstid).

Desuden er væsentlige forhold vedrørende simpel stofomsætning og stoftransport for de enkelte områder kortfattet belyst.

For hvert område er der udarbejdet en analyse af modelleret potentiale, nedsivning til øverste grundvandsmagasin samt grundvandsdannelse og perkolationstid til det primære magasin. Desuden er middelværdier for nedsivning og grundvandsdannelse i modelområdet beregnet. Ved simple metoder er infiltrations- og udstrømningsområder søgt afgrænset, og perkolationstid til primært magasin er beregnet ved simpel stempelstrømningsmetode. Der er desuden foretaget en kort beskrivelse af geokemiske forhold og vandindvindingsforhold. Endelig er der for større udvalgte vandværker foretaget en modelsimulering af indvindingsoplande og infiltrationsområder til udvalgte kildepladser.

Ud fra de tre områder er resultaterne af vurderingen søgt generaliseret til geologiske forhold som er typiske i Danmark. Denne generalisering tager udgangspunkt i en hydrogeologisk

tolkningsmodel. For hvert typeområde er anbefalet brug af simple metoder (temakort eller analytiske modeller/evt. 2D modeller) eller avancerede metoder (3D grundvandsmodeller).

I de tre områder Østfyn, Midtjylland og Sydvestjylland er grundvandsdannelsen til de dybe primære magasiner kun 20-25 % af nedsivningen til de øvre magasiner. Ved anvendelse af simple metoder vil man ikke have et præcist kendskab til grundvandsdannelsens størrelse til det pågældende dybe magasin, ligesom den arealmæssige fordeling ikke kan vurderes. En afgrænsning af hvilke arealer som primært bidrager med grundvandsdannelse, bliver derfor meget usikker ved brug af simple metoder. Undersøgelsen viser at simple metoder overvejende kan anvendes til zoner af grundvandsmagasiner i de tilfælde hvor magasinsystemet er relativt simpelt i sin opbygning, hvorimod zoner af flerlagsmagasiner eller komplekse magasinforhold forudsætter en nærmere analyse ved hjælp af en 3D grundvandsmodel samt partikelbanemodellering.

Fastlæggelse af infiltrationsområder og indvindingsoplande til kildepladser vurderes meget usikker ved brug af simple metoder. Det vurderes at en sikkerhedszone på 3-5 gange det optimale areal typisk vil være nødvendigt til fastlæggelse af indvindingsoplandet ved brug af simple metoder. Usikkerheder ved modelbaserede metoder vil være væsentligt mindre, såfremt der foreligger en veldokumenteret 3D grundvandsmodel. Grundvandsmagasiner som har relativ simpel hydrogeologisk opbygning, kan i mange tilfælde afgrænses ved hjælp af simple metoder (temakort, analytiske eller 2D modeller), hvorimod afgrænsning af indvindingsoplande for mere komplekse grundvandsmagasiner forudsætter en nærmere kortlægning af vandførende og lavpermeable lag samt 3D partikelbane modellering.

Konklusion

Simple metoder er generelt for usikre for en pålidelig afgrænsning af distribueret grundvandsdannelse og vurdering af gradientforhold. 3D grundvandsmodeller bør være et krav både i planlægningsfasen og under/efter detailkortlægningen, som et centralt element i analysen af zoneafgrænsningen.

Udgangspunktet vil være en indledende dataanalyse ud fra eksisterende data, indsigt i betydningen af sprækker og sandvinduer, stofs specifikke forhold og med opstilling af en hydrogeologisk tolkningsmodel. Herudfra fastlægges det nærmere behov for detaljeret kortlægning af grundvandsmagasiner og lavpermeable lag.

I den detaljerede kortlægning kan anvendes forskellige metoder afhængigt af om målet er vurdering af sårbare/følsomme områder med hensyn til nitrat, pesticider eller øvrige stofgrupper, bl.a. supplerende borer, geofysik, potentiale- og vandtypebestemmelser, aldersdatering mm. Denne fremgangsmåde sikrer konsistens og sammenhæng i detailkortlægningen i forhold til prioriteringen af områderne og detaljerede indsatsplaner for de konkrete områder.

Opstillingen af 3D grundvandsmodeller giver desuden mulighed for analyser af hvilke konsekvenser af ændringer i indvindingsstruktur, arealanvendelse og klima har for afgrænsningen af sårbare/følsomme områder, herunder afgrænsning af indvindingsoplande og infiltrationsområder.

1 Indledning

1.1 Baggrund

I forbindelse med amternes udpegning af områder med særlige drikkevandsinteresser er der behov for en zoneopdelt grundvandsbeskyttelse i disse områder med henblik på at gøre oprydning- og beskyttelsesindsatsen så effektiv som mulig (Miljøstyrelsen, 1995a). Derudover kan der være behov for særlige beskyttelsesforanstaltninger i indvindingsområder uden for områder med særlige drikkevandsinteresser.

I projektet "Zoneopdelt grundvandsbeskyttelse" blev der udarbejdet et koncept for en zonering i områder med særlige drikkevandsinteresser (Miljøstyrelsen, 1995b). Konceptet omfattede udpegning af fysisk og hygiejnisk zone ud fra afstandskrav samt særligt 'sårbare' beskyttelseszoner, eventuelt defineret med udgangspunkt i en stofs specifik beskyttelsesstrategi. I forbindelse med udarbejdelse af en vejledning for zonering er der blevet arbejdet videre med dette zoneringskonceptet, så det består af følgende zoner:

- fysisk sikringszone (radius 10 m omkring indvindingsboringer)
- kildepladszone (område inden for 300 m fra indvindingsboringer)
- indvindingszone (det grundvandsdannende opland/infiltrationsområdet til en kildeplads/indvindingsboring, dvs. den del af indvindingsoplandet hvor infiltrationen ved terræn forekommer)
- sårbarhedszone (det område på jordoverfladen, hvor den naturlige grundvandsbeskyttelse er lille som følge af permeable dæklag, præferentiel strømning gennem ler, geokemiske forhold mm.)

De metoder der i dag anvendes til afgrænsning af vandværkers indvindingsområder er forbundet med store usikkerheder (Miljøstyrelsen, 1995c). Især under mere heterogene hydrogeologiske forhold som er herskende i store dele af landet, vil en afgrænsning af indvindingszone eller sårbarhedszone, kræve et godt kendskab til de geologiske og hydrauliske forhold i dæklag og grundvandsmagasinerne.

Nye værktøjer til at indsamle supplerende geologisk viden under visse geologiske forhold, er udviklet (Miljøstyrelsen, 1995d). Men det første skridt i en praktisk zonering af et grundvandsopland er en samlet analyse af den hydrogeologiske ramme bestående af opstilling af en geologisk model og vurdering af grundvandets strømningsmønster og hastighed (Miljøstyrelsen, 1995e).

Den øgede indvinding fra dybereliggende grundvandsmagasiner, som følge af den stigende forurening af de øvre magasiner, medfører en række problemer i relation til en zonering. Dels er datagrundlaget ofte meget begrænset som følge af et mere begrænset antal dybe boringer, og dels er de nye metoder til geofysik kortlægning ofte begrænset til de øverste 20-30 meters jordlag. Det manglende datagrundlag kan medføre stor usikkerhed i zoneringen, selvom der eventuelt anvendes grundvandsmodeller.

Ved indvinding fra overfladenære såvel som fra dybe magasiner er der i forbindelse med zonering behov for en vurdering af hvor man kan anvende en simpel tilgang og hvor modelværktøjer bør anvendes.

1.2 Formål

Formålet med projektet er at udarbejde en eksempelsamling til illustration af de faglige problemstillinger i forbindelse med den praktiske afgrænsning af beskyttelseszoner under forskellige hydrogeologiske og indvindningstekniske forhold samt forskellige arealbelastningstyper, herunder at belyse metodevalget (simpel eller modelbaseret) med udgangspunkt i hydrogeologiske tolkningsmodeller for udvalgte områder og det eksisterende datagrundlag.

Projektet skal nærmere afklare og belyse usikkerheder ved anvendelse af simple metoder i forhold til modelbaserede, herunder belyse arealmæssige (og dermed økonomiske) konsekvenser ved de forskellige metoder for det samlede areal som skal zonerer. Nødvendige udgifter (tidsforbruget) i forbindelse med typisk zonerer af et indvindingsopland ved henholdsvis en modelbaseret tilgang og en mere simpel tilgang vurderes i forhold til de arealrelaterede udgifter der er knyttet til zonerede områder.

1.3 Rapportens indhold

I rapporten vurderes hvilke zoneringsprincipper det vil være hensigtsmæssigt at anvende på regionalt niveau (områder med særlige drikkevandsinteresser) og på lokalt niveau (indvindingsoplande til kildepladser) til en nærmere afgrænsning af beskyttelseszoner under forskellige hydrogeologiske forhold. Afgrænsningen af beskyttelseszoner vil ske med udgangspunkt i de hydrogeologiske og forureningsspecifikke forhold.

Betydningen af foretrukne transportveje gennem jordlagene (præferentiel strømning), glacialtektonisk variabilitet samt de naturlige geokemiske forhold er i korthed omtalt i rapporten bl.a. med referencer til resultater af Det Strategiske Miljøforskningsprogram (Grundvandsgruppen, 1997).

I kapitel 2 resumeres baggrund og forudsætninger for zoneringen med udgangspunkt i regeringens 10-punkts program, hensigter i forhold til depotoprydning og grundvandsbeskyttelse beskrives kort, Regionplan 97 og klassificeringen resumeres ligesom der redegøres for terminologien.

I kapitel 3 foretages en beskrivelse af hvilke elementer der bør være indeholdt i en hydrogeologiske tolkningsmodel (eller den konceptuelle model) af det naturlige grundvandssystem og det geokemiske miljø.

I kapitel 4 beskrives forskellige zoneringsmetoder baseret på grundvandets trykforhold, den arealdistribuerede grundvandsdannelse, transporttid, stofspecifikke forhold mm.

Kapitel 5 giver en yderst kortfattet introduktion til afgrænsning af indvindingsoplande.

Kapitel 6 skitserer en stokastisk baseret zonerer.

Kapitel 7 indeholder en beskrivelsen af resultaterne af afprøvningen af zoneringsprincipper i 3 konkrete områder.

2 Forudsætninger og afgrænsninger

2.1 Forudsætning for rapport

Ifølge Regeringens 10-punktsplan er målsætningen at vores drikkevandsforsyning skal baseres på rent grundvand, som kan anvendes efter simpel vandbehandling.

Med 'rent grundvand' menes at grundvandet skal overholde grænseværdier for drikkevand, evt. efter simpel vandbehandling. Koncentrationen af naturligt forekommende stoffer skal overholde drikkevandskravet. For miljøfremmede stoffer gælder at de som udgangspunkt ikke må forekomme i grundvandet, dvs. koncentrationen skal være under detektionsgrænsen. Der tilstræbes en bæredygtig udnyttelse af grundvandsmagasinet, så der også på lang sigt kan hentes 'rent' grundvand fra magasinet.

Af regeringens 10-punktsprogram til beskyttelse af grundvand og drikkevand fremgår, at amterne skal udpege områder med særlige drikkevandsinteresser. Disse områder skal indgå i de reviderede regionplaner, som træder i kraft i 1997. Der skal efterfølgende ske en yderligere kortlægning, således at særlige beskyttelsesforanstaltninger kan målrettes mod særligt sårbare zoner.

2.1.1 Drikkevandsudvalgets betænkning

I Drikkevandsudvalgets betænkning anbefales: "at det sikres, at der ud over den generelle indsats er de nødvendige virkemidler til rådighed til den påkrævede ekstra beskyttelse af områder med særlige drikkevandsinteresser samt af indvindingsområder uden for disse, som det efter en konkret vurdering findes hensigtsmæssigt at give en særlig prioritet. Fordelen ved denne løsning er, at man både sikrer den nuværende decentrale struktur i det omfang, det er hensigtsmæssigt ud fra en teknisk/økonomisk betragtning, og sikrer, at der så vidt muligt er velbeskyttede områder med en god vandkvalitet i reserve til at erstatte de indvindingsområder, som forurenes." (Miljøstyrelsen, 1997).

Omkring planlægning af grundvandsbeskyttelsen hedder det i drikkevandsudvalgets betænkning: "Prioriteringen i regionplanen skal i princippet omfatte hele amtet og indeholde en opgørelse over alle de områder, hvor der er behov for at iværksætte en indsats. Derudover skal planen indeholde en angivelse af prioriteringen af områderne og herunder angive tidsrammer for udarbejdelse af detaljerede indsatsplaner og iværksættelse af den faktiske indsats. Planen skal omfatte alle typer af forureningskilder. Planen skal også angive de områder i amtet, der er følsomme over for nitrat og/eller pesticider, kortlagt på baggrund af ensartede og objektive kriterier."

Ved nitratfølsomme indvindingsområder forstås ifølge Drikkevandsudvalgets betænkning nitratfølsomme dele af områder med særlige drikkevandsinteresser, samt de indvindingsoplunde til vandværker uden for områder med særlige drikkevandsinteresser, som er nitratpåvirkede. Målsætningen for beskyttelsen af disse grundvandsmagasiner, skal være et nitratindhold på under 25 mg nitrat pr. l. Inden for de nitratfølsomme indvindingsområder vil der på grund af variationer i den geologiske beskyttelse og i arealanvendelsen ofte kun være behov for særlig regulering af den nuværende arealanvendelse på en vis del af arealet.

Med hensyn til pesticider er det drikkevandsudvalgets opfattelse: "at det vil være en ekstra sikkerhed at forbyde eller begrænse anvendelsen af pesticider i særligt følsomme områder, men udvalget finder ikke, at der på nuværende tidspunkt findes et tilstrækkeligt sagligt grundlag for at indføre generelle regler om sådanne forbud eller begrænsninger. For at vurdere, hvor der er behov for at indføre en ekstra sikkerhed mod forurening med pesticider,

må der gennemføres en følsomhedskortlægning (zonerings). Hvor en sådan kortlægning dokumenterer, at der for at opretholde en høj grundvandskvalitet, egnet til produktion af drikkevand, er behov for at forbyde eller begrænse anvendelsen af pesticider i et område, skal dette indarbejdes i indsatsplanen for området. I det omfang det ikke er muligt at realisere indsatsplanen ved frivillige aftaler, kan det være nødvendigt at pålægge tvungne restriktioner, jf. proceduren for restriktioner over for nitrat.”

“Formålet med ovennævnte kortlægning er at påvise bl.a. de arealer, hvor der er behov for en ændret arealanvendelse. Den nødvendige og tilstrækkelige detaljeringsgrad vil afhænge af de lokale geologiske forhold.” Drikkevandsudvalget understreger: “at det tilvejebragte dokumentationsgrundlag skal være tilstrækkeligt til, at eventuelle nødvendige myndighedsbeslutninger over for borgerne kan træffes, f.eks. beslutninger om at pålægge dyrkningsrestriktioner eller ekspropriation i forbindelse med afværgeforanstaltninger over for depoter” (Miljøstyrelsen, 1997).

2.1.2 Formål med zonerings

Det overordnede formål med udpegningen af områder med særlige drikkevandsinteresser og med en zonerings af disse eller zonerings inden for oplande til vandværker beliggende uden for områder med særlige drikkevandsinteresser er at sikre en kvalitet af grundvandet som fortsat gør det egnet til produktion af drikkevand (uden brug af avanceret vandbehandling). Målet er at:

- Den nuværende grundvandskvalitet opretholdes eller forbedres
- Beskyttelsesindsats og oprydning optimeres

Et grundprincip kunne være at miljøfremmede stoffer som anvendes på arealer (f.eks. pesticider) ikke må kunne udvaskes til grundvandet i målelige koncentrationer i et givent område. Kravet til godkendelsen af pesticider er i dag at koncentrationen er maksimalt 0,1 mikrogram/l i det vand som forlader rodzonen. Med den nuværende godkendelsespraksis er det derfor muligt at man i visse områder vil konstatere pesticider (aktivstoffet og eller dets metabolitter) under grænseværdien men på op til 0,1 mikrogram/l i vandfasen.

Hvis man derfor ønsker at have grundvand fri for pesticider, kan der være behov for at etablere supplerende beskyttelseszoner på baggrund af en mere konkret vurdering i forhold til et områdes sårbarhed. Etablering af sådanne beskyttelseszoner kan ske ved frivillige aftaler. I det omfang det ikke er muligt at realisere etableringen af beskyttelseszoner ved frivillige aftaler, kan det være nødvendigt at pålægge tvungne restriktioner. Da dette ikke er muligt med det nuværende lovgrundlag, har drikkevandsudvalget anbefalet at der tilvejebringes hjemmel til - mod kompensation til de berørte jordejere - at pålægge de nødvendige restriktioner i pesticidanvendelsen i disse områder (Miljøstyrelsen, 1997).

En konkret vurdering af grundvandets sårbarhed indebærer følgende forhold:

- (1) grundvandsmagasinet naturlige beskyttelse,
- (2) risikoen for udvaskning af de enkelte stoffer til grundvandsmagasinet som følge af sædskifte og doseringspraksis og
- (3) de enkelte stoffers transport og omsætnings karakteristika.

Det enkelte grundvandsmagasin udgør udgangspunktet for en konkret zonerings. Vurderinger af den naturlige beskyttelse omfatter:

- (1) rodzonen og umættet zone og
- (2) øvrige dæklag over grundvandsmagasinet evt. indeholdende sekundære magasiner.

2.2 Afgrænsning af rapport

De her behandlede zoneringsmetoder er rettet mod flade-, linie- og punktkildeforurening på eller tæt på terrænoverfladen. Konkrete og detaljerede forslag til tilladte belastninger med

forskellige forurenende stoffer i forskellige beskyttelseszoner behandles ikke, ligesom forringelse af den naturlige grundvandskvalitet ved overudnyttelse ikke berøres.

Der er foretaget følgende yderligere afgrænsning af problemstillingen således at (kun) følgende forhold søges behandlet, med hovedvægten lagt på punkt 1 og 3:

1. håndtering af nuværende grundvandstruende aktiviteter (fladekilder)
2. oprydning af fortidens synder (punktkilder)
3. planlægning af fremtidig arealanvendelse og håndtering af ulykker

ad 1: Nuværende grundvandstruende arealanvendelse er i landbrugsområder anvendelse af kvælstofgødninger og pesticider samt nedbrydningsprodukter af disse. Lokalt kan også sur nedbør og tungmetalbelastning være problematisk, ligesom byområder, veje, jernbaner mm. medfører potentielle grundvandstrusler.

ad 2: Hvordan opnås mest rent grundvand for de afsatte midler til oprydning, under forudsætning af ønsket om bæredygtig udnyttelse af grundvandsmagasinet:

- prioritering af oprydning af forureningskilder med udgangspunkt i transporttid, transport- og nedbrydningssegenskaber samt ressourcens størrelse og betydning
- nuværende affaldsdeponeringsanlæg og industrigrunde forudsættes håndteret med eksisterende godkendelsesprocedure mm.

ad 3: I den fysiske planlægning (regionplanlægning) er der visse muligheder for fremover at forhindre grundvandstruende aktiviteter i områder med særlige drikkevandsinteresser. Dette kan f.eks. gælde ved udlægning af byområder, placering af trafik anlæg eller ved placering af skovrejsningsområder med henblik på grundvandsbeskyttelse.

2.3 Udgangspunktet for zoneringsen er Regionplan 1997

I forbindelse med regionplan 1997 er der foretaget en klassificering af grundvandsressourcen med hensyn til mængde, kvalitet og naturlig beskyttelse. I selve Regionplan 1997 blev udpeget områder med særlige drikkevandsinteresser, områder med drikkevandsinteresser og områder med begrænsede drikkevandsinteresser. Zoneopdelt grundvandsbeskyttelse forventes i første omgang gennemført i områder med særlige drikkevandsinteresser men derudover kan der i vandindvindingsoplande til vandværker uden for områder med særlige drikkevandsinteresser foretages en detailkortlægning og zonerings af særligt følsomme områder.

Ved vurderingen af grundvandsmagasiners naturlige beskyttelse er der foreslået udarbejdet følgende temakort:

- grundvandspotentialekort med grundvandsoplande
- magasintype
- afgrænsning af udstrømnings- og infiltrationsområder
- nettonedbør
- beskrivelse af jordarter i dæklag og grundvandsmagasiner
- akkumuleret tykkelse af lavpermeable lere og moræneler over grundvandsmagasiner (diverse geokemiske kort)
- udbredelse af lag med højt indhold af organisk stof
- udbredelse af særlig pyritholdige jordlag
- lækage mellem magasiner
- oxideret lagtykkelse

På nuværende tidspunkt er det klart, at samtlige disse temakort ikke vil foreligge i løbet af 1997 for alle amter. Uanset om temakortene foreligger eller ej, må det imidlertid for hvert enkelt drikkevandsområde vurderes hvilke principper der ønskes lagt til grund for en zone-

ring samt om datagrundlaget er tilstrækkeligt til at gennemføre den ønskede metode.

Det vil ikke være hensigtsmæssigt at gennemføre en zonerings på et for dårligt grundlag (f.eks. usikre temakort). Indsamling af supplerende data bl.a. ved geofysisk kortlægning, aldersdatering, geokemisk karakterisering, og pejlinger bør grundigt overvejes. Supplerende analyser ved opstilling af geologisk model, vurdering af glacialtektonisk variabilitet og opstilling af grundvandsmodeller til at sammenstille vidensgrundlaget for et område vil i mange tilfælde kan være hensigtsmæssigt og nødvendigt.

Zonering af grundvandsoplande bygger videre på den kortlægning af grundvandsmagasiners naturlige beskyttelse som er gennemført i forbindelse med Regionplan 1997 (Miljøstyrelsen, 1995a). I denne kortlægning er lagt op til 3 beskyttelsesklasser: *God beskyttelse*, *Nogen beskyttelse* og *Ringe/ingen beskyttelse* som gennemføres både med en *generel vurdering* og med en *stofspecifik vurdering*. Den stofspecifikke vurdering er ikke gennemført ved overordnet kortlægning på det foreliggende grundlag. I tabel 2.1 er klassificeringen af beskyttelsen illustreret.

Tabel 2.1: Definition af godt beskyttede områder og sårbarhedszoner (jf. Miljøstyrelsen, 1995a)

Zonering	Godt beskyttede områder	Sårbarhedszoner	
Klassificering	God beskyttelse	Nogen beskyttelse	Ringe/ingen beskyttelse
Definitioner	<p>Generelle forhold</p> <ul style="list-style-type: none"> • grundvandets trykniveau er over terræn <u>eller</u> • opadrettet gradient i magasin <u>eller</u> • meget ringe nedsivning til magasin, dvs. at dæklag består af lavpermeable bjergarter som smeltevandsler eller marint ler i tykkelser over 10 m eller over 30 meter tykke lag af moræneler <p>Stofspecifikke forhold</p> <ul style="list-style-type: none"> • væsentlig reduktion/tilbageholdelse ¹⁾ af forurening i umættet zone-/dæklag 	<p>Generelle forhold</p> <ul style="list-style-type: none"> • sammenhængende lavpermeable dæklag, f.eks. sammenhængende lag af smeltevandsler/marint ler af mere end 5 meters tykkelse eller morænelerslag af mere end 15 til 30 meters tykkelse (forsinket forureningsspredning for <u>visse</u> typer forurenende stoffer) <p>Stofspecifikke forhold</p> <ul style="list-style-type: none"> • betydelig reduktion/tilbageholdelse ¹⁾ af forurening i umættet zone/dæklag <u>eller</u> • betydelig reduktion/tilbageholdelse ¹⁾ af forurening i magasin <u>eller</u> • gode naturlige betingelser for forureningsreduktion (men kvantificering af reduktionspotentiale i.f.t grænseværdier for drikkevandskvalitet er ikke mulig) 	<p>Generelle forhold</p> <ul style="list-style-type: none"> • højpermeable/opsprækkede dæklag <u>eller</u> • magasinbjergart i dagen <p>Stofspecifikke forhold</p> <ul style="list-style-type: none"> • ingen eller meget begrænset forureningsreduktion ¹⁾ <u>eller</u> • ringe eller ingen naturlige betingelser tilstede for forureningsreduktion (fravær i forhold af betydning for sorption, omsætning m.v.)
¹⁾ i forhold til grænseværdier for drikkevand			

For mange miljøfremmede stoffer mangler der i dag kvantificerbar viden om deres opførsel i forskellige geologiske miljøer, f.eks. med hensyn til sorption og nedbrydning. I løbet af 5-10 år må dog forventes opbygning af ny viden om en række stoffer, bl.a. bestemte grupper af pesticider. Det er vigtigt at det anvendte zoneringskoncept kan rumme ny viden efterhånden som den opbygges. Som et eksempel på stofspecifik zonerings, hvor viden i dag anses for tilgængelig, kan nævnes nitrat og pesticidgruppen fenoxysyrer (se tabel 2.2).

Tabel 2.2: Eksempel på stofs specifik sårbarhedsvurdering for Nitrat og Fenoxysyrer (Miljøstyrelsen, 1995a)

Godt beskyttede områder God beskyttelse	Sårbarhedszoner	
	Nogen Beskyttelse	Ringe/ingen beskyttelse
<p>Nitrat</p> <ul style="list-style-type: none"> dæklag af ler, fedt, gråt <u>eller</u> dæklag af glimmerler <u>eller</u> dæklag med højt organisk indhold, evt. brunkul <u>eller</u> tykkelse af reduceret lerdæklag er > 15 m ¹⁾ <u>eller</u> reduceret magasinbjergart med indhold af organisk materiale, pyrit eller evt. brunkul <p>Pesticidgruppen Fenoxysyrer: <ul style="list-style-type: none"> se generelle forhold (tabel 2.1) </p>	<ul style="list-style-type: none"> dæklag af ler, gråt <u>eller</u> dæklag af sand, gråt, gråsort med lignit, pyrit <u>eller</u> dæklag af sand, oxideret med slirer af silt og ler <u>eller</u> dæklag af sand, reduceret, gråt <u>eller</u> tykkelse af lerdæklag er 5-15 m <u>eller</u> reduceret magasinbjergart <ul style="list-style-type: none"> oxiderende forhold i dæklag og magasin <u>og</u> dæklag større end 15 m <u>eller</u> dæklag med højt organisk indhold 	<ul style="list-style-type: none"> dæklag af sand, oxideret gulligt-gulbrunt <u>eller</u> dæklag af ler, gulbrunt <u>eller</u> ler 0-5 m u. terræn <u>eller</u> tykkelse af lerdæklag er < 5 m <u>eller</u> magasinbjergart uden større reduktionspotentiale <ul style="list-style-type: none"> reducerende forhold i dæklag og magasin
<p>1) er ikke gyldigt, hvor tektonisering og/eller usammenhængende lerlag er af væsentlig betydning for infiltrationsmønstrer. Hvor der er større lertykkelser (> 15 m) af oxideret ler over grundvandsmagasinet, vil dette kun have en forsinkende effekt på nitratnedsivningen.</p>		

Klasseinddelingen i tabel 2.2 er dels foretaget efter Gravesen et al. (1990), hvor jordarternes reduktionskapacitet overfor nitrat er vurderet, og dels ud fra følgende generelle erfaringer:

- lerdæklag er som oftest oxideret i de øverste 3-5 meter,
- de øverste 5-15 meter moræneler er ofte opsprækket,
- mere end 15 meter reduceret moræneler over et grundvandsmagasin vil have en stor reduktionskapacitet overfor det nedsivende nitrat - med mindre tektonisering og /eller usammenhængende lerlag er af væsentlig betydning for infiltrationsmønstrer.

I forbindelse med sårbarhedskortlægninger i amterne har de vigtigste parametre for klassificering af grundvandsmagasinerne sårbarhed været lertykkelse/lerudbredelse evt. kombineret med skelnen mellem frit/artesisk magasin. Lertykkelsen kan f.eks. være bestemt som akkumuleret lertykkelse over filter niveau baseret på boringsoplysninger.

Som det fremgår af tabel 2.2, er der direkte modstrid mellem god og dårlig beskyttelse for stofgrupperne nitrat og fenoxysyrer. Mens reducerende forhold i lerdæklag på mere end 15 meter giver god beskyttelse for nitrat, forekommer den bedste beskyttelse for fenoxysyrer i områder med oxiderende forhold i dæklag eller umættet zone med en tykkelse over 15 meter.

3 Opstilling af en hydrogeologisk tolkningsmodel

3.1 Definition og antagelser

Det første skridt i forbindelse med afgrænsning og udpegning af beskyttelseszoner i et område er opstilling af en hydrogeologisk tolkningsmodel for området. En hydrogeologisk tolkningsmodel er en hypotese for hvordan det hydrogeologiske system er opbygget og hvordan de hydrologiske processer forløber og samvirker. Den kaldes også en konceptuel model.

Det er den geologiske ramme, grundvandets tryk- og strømningsforhold samt vandbalancen, der er de overordnede elementer i en konceptuel hydrogeologisk model.

Den konceptuelle hydrogeologiske model skal således indeholde en forklarende beskrivelse af de antagelser der er gjort vedr. de forhold, som er styrende for de processer man ønsker at analysere, dvs.:

- er der opstillet en tilstrækkelig detaljeret geologisk model for området
- er der udbredte lavpermeable dæklag over/mellem magasiner?
- er der strukturelle forhold som der skal tages hensyn til, f.eks. 'vinduer', isforstyrrelser, sprækkezoner etc. ?
- hvordan varierer det geokemiske miljø ned gennem lagfølgen?
- er der tale om frie eller artesiske magasiner?
- hvor foregår nedsivningen og grundvandsdannelsen?
- hvordan strømmer grundvandet mellem de forskellige magasiner?
- hvordan foregår vandudvekslingen mellem magasiner og overfladevand?
- stemmer vandbalancen?

I forbindelse med zonerings der ikke er stofs specifik er det især grundvandsdannelsens arealmæssige fordeling (herunder betydning af sandvinduer og sprækker), grundvandets strømningsmønstre i lagene over grundvandsmagasinet (herunder gennem hurtige transportveje, såkaldt præferentiell strømning) samt i visse tilfælde afgrænsningen af indvindingsoplandet som er af basal interesse. Helt centralt i disse overvejelser er skalaforholdenes betydning, samt hvordan heterogeniteter repræsenteres og evt. opskaleres.

3.2 Typeområder

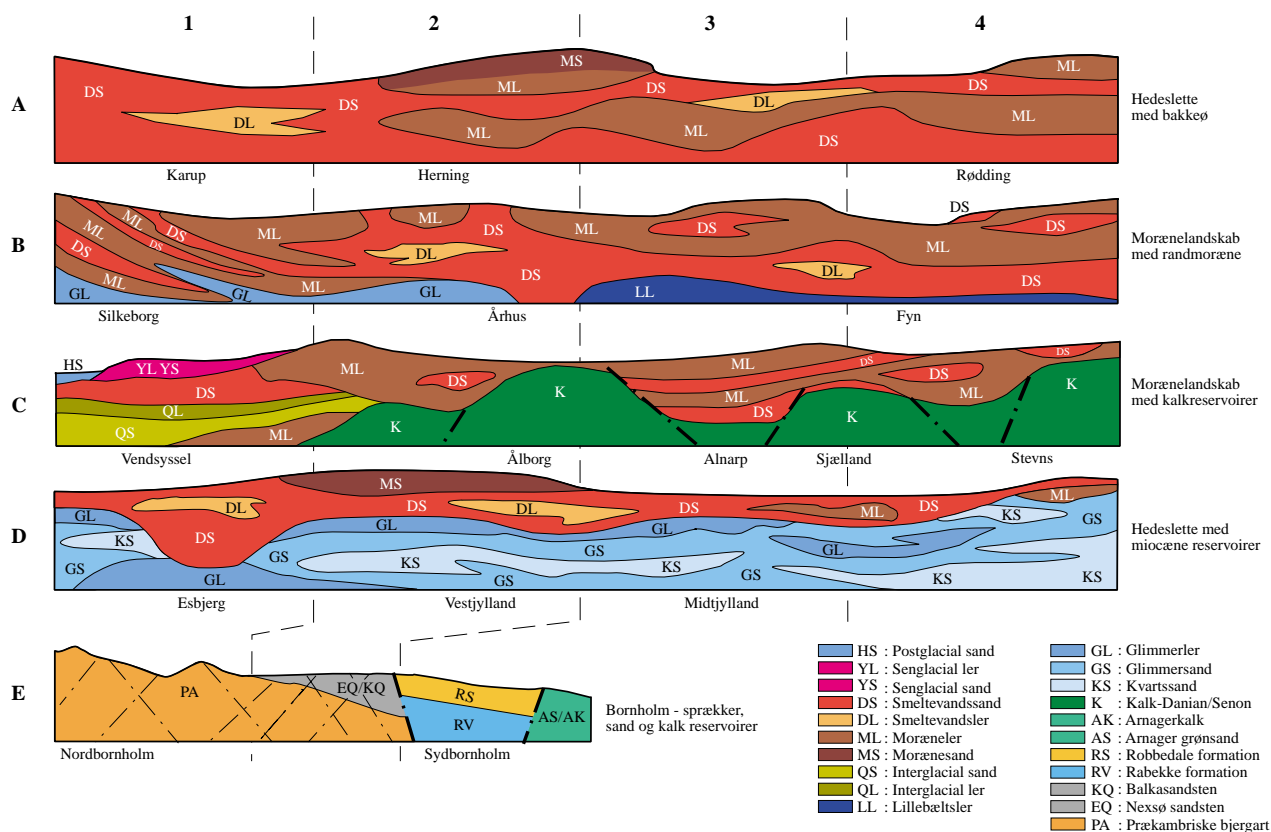
Den danske geologi er meget varierende fra landsdel til landsdel også i de øverste 100-200 m hvor interessen mht. drikkevand samles. I figur 3.1 er vist eksempler på forskellige hydrogeologiske typeområder, som afspejler forholdene forskellige steder i landet (Miljøstyrelsen, 1995b).

De varierende geologiske forhold betyder at man i visse områder for visse grundvandsmagasiner er nødt til at anvende mere avancerede grundvandsmodeller for med rimelighed at kunne afgrænse beskyttelseszoner, mens man i andre områder med en mere enkel geologisk opbygning kan anvende simple metoder baseret på f.eks. temakort til udpegning af beskyttelseszoner.

F.eks. vil grundvandsdannelsen typisk foregå relativt jævnt fordelt i sandede områder, hvorimod den vil være koncentreret i sandvinduer i morænelersområder i Østjylland og på

Øerne, hvor morænelersdækket er tyndt og evt. opsprækket. Der vil her kunne finde en øget infiltration sted i forhold til områder med tykkere morænelerslag over grundvandsmagasinerne (Miljøstyrelsen, 1995b). Grundvandsdannelsen kan nærmere kortlægges ved hjælp af aldersdatering, f.eks. baseret på CFC datering af øvre grundvand.

Dæklagens geologiske rumlige opbygning er af afgørende betydning for grundvandets strømningsmønster. I områder med flerlagsmagasiner er det væsentligt, at den hydrogeologiske tolkningsmodel klart beskriver sådanne forhold, således at potentialeforhold, vandindvinding etc. knyttes til de rette lag.



Figur 3.1 Eksempler på hydrogeologiske tolkningstyper

3.3 Hydrogeologisk tolkning

Den hydrogeologiske tolkningsmodel er væsentlig for hvordan de geologiske lag nærmere vurderes, med hensyn til vandførende egenskaber. I tilfælde af sandlag med lerlag af begrænset udstrækning bør der således ses bort fra disse linser ved f.eks. kortlægning af lerlagstykkelse. I tilfælde af lavpermeable lag med vinduer af sandlag, bør det vurderes hvordan disse repræsenteres i såvel model som evt. simple metoder.

Ligeledes giver en god tolkningsmodel et billede af de overordnede strømningsforhold og vandbalancen. Denne er nyttig med henblik på at vurdere hvorvidt det er en god antagelse f.eks. at se bort fra horisontale strømningsveje gennem øvre magasiner, dvs. problemet med at projicere et indvindingsopland op til terræn.

En veldokumenteret hydrogeologisk tolkningsmodel er en forudsætning for grundvandsmodellering (med henblik på at synliggøre den samlede opfattelse af det hydrologiske og hydrauliske system). Den konceptuelle model udgør en tolkning (baseret på indsamlede data) af de karakteristika og den dynamik i det fysiske system, som findes i det undersøgte område. Den bør inkludere en diskussion af grundvandsmagasinsystemet (både mht. geologiske og hydrologiske aspekter), hydrologiske afgrænsninger, hydrauliske størrelser (ledningsev-

ne, magasintal og porøsitet), samt input og output i vandbalancen (infiltration, dræn og vandløb). Detaljeringsgraden af tolkningen skal være konsistent med de tilgængelige data. Hvordan data er fremkommet, styrker, mangler og disses indflydelse på den konceptuelle model skal beskrives og diskuteres.

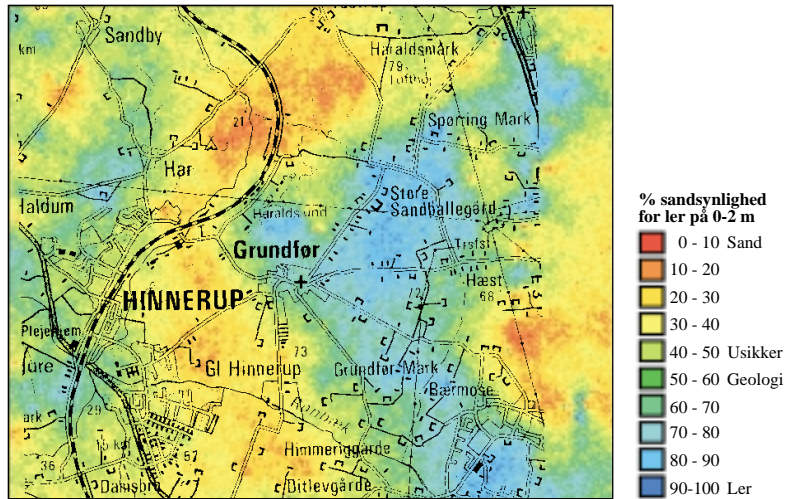
3.3.1 Lertykkelseskort

Udbredte, sammenhængende morænelersdækker over de danske grundvandsmagasiner har traditionelt været betragtet som beskyttende i forhold til forurenende stoffers muligheder for at sive ned til grundvandet. Dette skyldes at morænelerets matrix har en lav hydraulisk ledningsevne, og der dermed foregår en langsom vandbevægelse i det, således at de forurenende stoffer har en lang opholdstid i leret. Herved kan de reduceres, sorberes eller nedbrydes. Filosofien har været: 'Jo tykkere lerlag og jo større horisontal udbredelse, jo bedre beskyttelse af grundvandet'. Omkring 40 % af Danmarks areal består af moræneler i den øverste meter af jordlagene, og morænelerets tykkelse, sammensætning og strukturer har derfor stor betydning for nedsivningsforholdene (Gravesen, 1997).

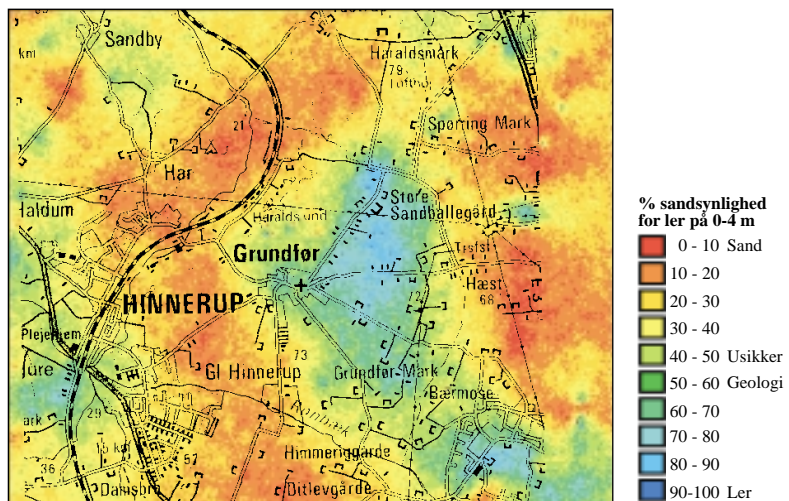
I forbindelse med de seneste års sårbarhedskortlægninger i bl.a. amterne har nogle af de vigtigste parametre for at klassificere grundvandsmagasineres sårbarhed således været lertykkelse og lerudbredelse, der f.eks. har været illustreret som lertykkelseskort eller akkumuleret lertykkelse over filter niveau baseret på boringsoplysninger (Gravesen, 1997).

Inden for de seneste år er der imidlertid to centrale forhold med hensyn til morænelers egenskaber og optræden som særligt er kommet i fokus: 1) lodrette sprækker og 2) sandvinder. Lodrette sprækker gennem de enkelte morænelerslag har vist sig at have stor betydning for vandnedtrængningen gennem lagene, og den hydrauliske ledningsevne er således væsentligt højere end i dybere liggende mere homogene morænelerslag.

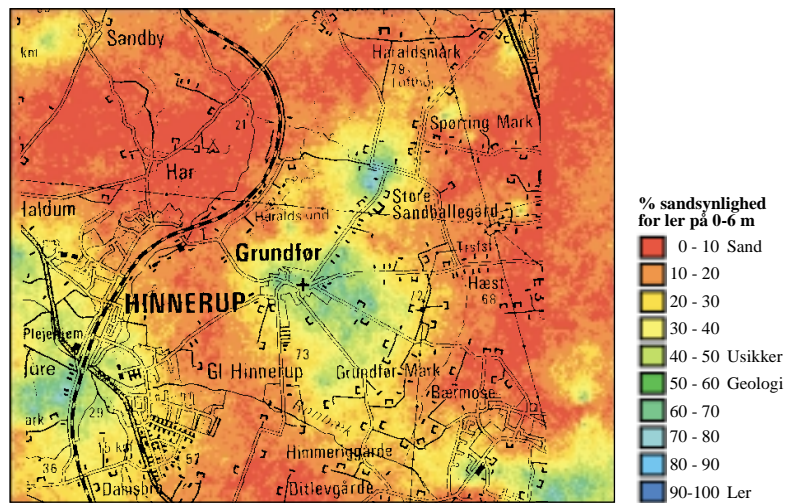
**Grundfør - Hinnerup
0 - 2 meter**



**Grundfør - Hinnerup
0 - 4 meter**



**Grundfør - Hinnerup
0 - 6 meter**



Figur 3.2 Kort der viser sandsynlighed for ler på 0-2, 0-4 og 0-6 meter i Grundførområdet (Hver figur er baseret på 50

sekventiel indikator simuleringer ud fra forhåndenværende boringsdata; Gravesen & Hansen, 1997).

3.3.2 Sprækker og sandvinduer

Nitratholdigt eller pesticidholdigt vand siver derfor relativt hurtigt ned til grundvandszonen når vandspejlet ligger inden for de øverste 10 meter, men det har heldigvis også vist sig, at der sker en reduktion af nitrat i sprækkerne, især hvis de har et højere organisk indhold. På større dybde kendes sprækkers udbredelse og strukturer ikke i detaljer, bl.a. på grund af vanskelighederne med at undersøge strukturforholdene i de dybereliggende lag. Sandvinduer er områder, hvor lerlaget er tyndt eller fraværende, og undersøgelserne viser, at hovedparten af det nye grundvand dannes her (Grundvandsgruppen, 1997).

For at efterforske sandvinduer er det nødvendigt at udføre dybere borer og anvende geofysiske undersøgelsesmetoder. Boringer giver ud fra boreprøver og borehulslogging detaljerede oplysninger om sedimenternes sammensætning i netop borepunktet, og et videre arbejde med at forbinde jævnaldrende lag mellem borer kræver detaljeret viden om muligheder for at korrelere fra lag til lag mellem borerne (stratigrafien). En geologisk model baseret på disse data viser mulighederne for de forskellige lags udbredelse, men ikke deres konkrete beliggenhed i alle punkter. Geofysiske undersøgelser styrke er at bidrage til at få sammenhæng i oplysningerne mellem borerne, og til at påvise konkrete transportveje i magasinerne.

Sprækker kan kun kortlægges ved detaljerede og omkostningskrævende undersøgelser, bl.a. borer og gravninger. Her er de geofysiske undersøgelser ikke velegnede.

3.3.3 Kortlægning af glacialtektonisk variabilitet

Indtil videre er det dokumenteret at morænelerslag med tykkelser på 5-8 meter er opsprækkede. I tykkere lerlag på mere end 10 meter vil betydningen af sprækker antagelig være mindre, uden at dette er en garanti for at de ikke forekommer og kan være betydningsfulde for transport af stoffer (Gravesen, 1997; Grundvandsgruppen, 1997). Sandvinduernes beliggenhed kan kun påvises ved detaljerede undersøgelser, og de to parametre: 'sprækker' og 'vinduer' er det nødvendigt at have styr på når der skal gennemføres en zonerings af et konkret område.

Formålet med kortlægning af glacialtektonisk variabilitet er at afgrænse områder hvor lagene fra isens belastning i istiden er forstyrrede i forhold til områder hvor de er uforstyrrede, eller blot mindre forstyrrede. Pålideligheden af zonerings, hvad enten der anvendes simple metoder eller modeller, er i høj grad afhængig af hvorvidt lagene ligger uforstyrrede eller ej (Jacobsen, 1997).

I de kvartære lag og til en vis grad i de prækvartære, er der sket glacialtektoniske forstyrrelser af varierende grad. Graden af tektonisering kan variere fra at være uforstyrret eller næppe synlig til at strukturerne er det dominerende element i den geologiske opbygning. Parametre til bestemmelse af tektonisk variabilitetsgrad består af:

Overfladegeologi (arealer med uforstyrret dække: sen-glaciale eller postglaciale smeltvandsaflejringer, ferskvandsaflejringer og marine aflejringer; stratigrafi: Weichsel, Saale og prækvartære aflejringer).

Morfologi (bl.a. randmorænebakker og lignende).

Prækvartæroverfladens morfologi (dybe dale og markante højdedrag).

Boringsoplysninger (kote og tykkelse af geologiske enheder; flager registreret i borer).

Kystklinter og råstofgrave (tektonisk variabilitetsgrad ses direkte i profiler, de uforstyrrede lags hældningsretning kan måles og tykkelse af geologiske enheder kan bestemmes).

En kortlægning af den glacialtektoniske variabilitet kan gennemføres på regional skala og give værdifulde informationer vedr. forstyrrelsen af lagene i et område.

3.3.4 Opstilling af geokemisk model til vurdering af pesticidudbredelse i grundvand

Ved vurdering af sorption og nedbrydning af f.eks. pesticider skal en række geokemiske forhold belyses (Ernstsen, 1997), men videngrundlaget til vurdering af nedbrydning og sorption af pesticider i jord og grundvand vil formentlig først være til stede om tidligst ca. 5 år.

Kendskab til geologien i området. På baggrund af foreliggende geologiske oplysninger karakteriseres dæklagene ved mængden af sand og ler og om mulig også ved bl.a. mineralogisk sammensætning incl. lermineralogi. Foreliggende prøver fra laboratorieundersøgelser af sorption af specifikke pesticider ved tilsvarende geologiske forhold inddrages og om nødvendigt bør gennemføres yderligere laboratorieforsøg, såfremt det foreliggende datagrundlag ikke er tilstrækkeligt.

Organisk stof. Foruden kornstørrelsesfordelingen har der hidtil været fokuseret meget på organisk stofs rolle i forbindelse med omsætningen af pesticider. Disse oplysninger fås kun i begrænset omfang fra eksisterende boringsdata og det vil normalt være nødvendigt at supplere med laboratoriemålinger.

Kalkindhold. Kalkindhold og pH variation i dæklagene og dermed forsuringsfronten kan hentes fra eksisterende boredata, hvor bemærkninger om kalkfrit eller kalkholdigt sediment findes beskrevet. Supplerende oplysninger om disse forhold ved regionale studier kan være nødvendige.

Redoxfronten der indikerer skiftet fra oxiderende til reducerende geokemiske forhold, kan kortlægges ved allerede eksisterende farvebeskrivelser af boringer. Supplerende data kan være nødvendige ved regionale studier.

Udbredelsen af sprækker og indgående beskrivelse. Udbredelsen af sprækker og det hertil knyttede kemiske og mineralogiske miljø vil typisk kunne relateres til 2-3 typekategorier af sprækker, med udgangspunkt i detailundersøgelser som gennemføres i udvalgte områder i forbindelse med bl.a. Det Strategiske Miljøforskningsprogram 1.5. Den vertikale udbredelse af sprækker vil blive undersøgt ved et regionalt studie ved Flakkebjerg på Vestsjælland.

Supplerende boringer. I det omfang, at der i forbindelse med en zonerings gennemføres boringer, vil det være hensigtsmæssigt at udtage vandprøver til kemisk bestemmelse af redox aktive komponenter, samt sedimentprøver til foretagelse af farvebestemmelser samt mineralogiske forhold (redox kapacitet og redox forhold).

3.3.5 Vurdering af nitratudbredelse

Afhængigt af redoxforholdene i sedimenterne kan der under nedsivning af nitrat foregå en reduktion af nitrat til frit kvælstof ved oxidation af bl.a. pyrit og organisk stof eller ved strukturelt bundet ferrojern i lermineraler til ammonium (Ernstsen, 1996). I dele af landet, f.eks. i Vendsyssel, med opstigende methan fra dybtliggende marine aflejringer kan der ligeledes ske en reduktion af nitrat. Udbredelsen af nitratholdigt grundvand (nitratfronten) er bestemt ved typen og mængden af reducerende stoffer i jordlagene samt af grundvandets strømningsforhold. Ligeledes er nedsivningen af nitratholdigt vand i lerjordsområder generelt langsom og gennem en ofte tynd oxideret zone. Nitratindholdet reduceres derfor, således at grundvandet under sammenhængende lerlag sjældent er stærkt belastet (Ernstsen et al, 1990; GEUS, 1995).

Laboratorieundersøgelser på store morænelersprøver har vist at der især sker transport af vand og opløste stoffer i sprækkerne og de øvrige makroporer. Under iltfattige forhold kan der ske en reduktion af nitrat i sprækkerne, som medvirker til at formindske den nitratmængde som kan nå ned til grundvandet. Imidlertid viser målinger i Grundfjørøområdet at nitratindholdet i jordvandet og i det øverste grundvand næsten er lige stort. Dette skyldes en kun delvis reduktion i de overliggende lerlag eller at nitratholdigt vand dannet i områder

med tynde lerlag eller med sandvinduer strømmer til horisontalt. I sandvinduerne er mulighederne for nitratreduktion samtidig ringere end i lerområderne, da sand og grus i Grundfjorområdet viste sig at have ringe indhold af komponenter (organisk stof, pyrit, ler) der kan reducere nitrat i det nedsivende vand (Ernstsen & Thorling, in prep.; Ernstsen, 1997).

3.4 Konklusion

Det første skridt i forbindelse med afgrænsning og udpegning af beskyttelseszoner i et område er opstilling af en hydrogeologisk tolkningsmodel, som er en hypotese for hvordan det hydrogeologiske system er opbygget og hvordan de hydrologiske processer forløber og samvirker.

Inden for de seneste år er der blevet fokuseret på dels betydningen af lodrette sprækker og dels forekomst af sandvinduer i områder med morænelersdække. Det er dokumenteret at morænelerslag med tykkelse på 5-8 meter er opsprækkede, og at sandvinduernes beliggenhed kun kan påvises ved detaljerede undersøgelser. Det er ved kortlægning af lertykkelser og -udbredelser i forbindelse med zonerings vigtigt at have styr på såvel 'sprækker' som 'sandvinduer'.

En kortlægning af glacialtektonisk variabilitet kan gennemføres på regional skala og give værdifulde informationer vedr. forstyrrelsen af lagene i et område. Aldersdatering og analyser af nitrat og pesticider sammenholdt med geokemisk kortlægning kan indgå i kortlægningen, med henblik på at dokumentere grundvandsdannelsens størrelse og den naturlige beskyttelse eller forsinkelse, som sammenhængende lerlag af en given tykkelse yder i et konkret område i forhold til udbredelsen af f.eks. nitrat- eller pesticider.

4 Zoneringsmetoder

4.1 Vurdering af zoneringsmetoder

Den praktiske afgrænsning af sårbarhedszoner inden for områder med særlige drikkevandsinteresser eller inden for indvindingsoplande uden for områder med særlige drikkevandsinteresser kan foretages ved anvendelse af følgende *simple eller modelbaserede metoder*:

- simple temakortbaserede metoder eller
- grundvandsmodeller og hydrologiske modeller.

Vurderingen af forskellige zoneringsmetoders egnethed i forhold til en given indsats i et konkret område afhænger såvel af stofs-specifikke forhold, de konkrete hydrogeologiske forhold, datagrundlaget men også en afvejning mellem en generel beskyttelsesindsats (f.eks. på landsplan) i forhold til vægtningen af den yderligere beskyttelsesindsats i konkrete følsomme områder. Fordele og ulemper ved zonerung kan anføres som vist i tabel 4.1.

Tabel 4.1 Nogle fordele og ulemper ved zonerung

Skeptikere	Realister
<ul style="list-style-type: none">• alt grundvand er sårbart, det er kun et spørgsmål om tid før forureningen bryder igennem• hydrogeologiske forhold er så komplekse at en pålidelig detaljeret zone afgrænsning ikke kan gennemføres• zonerung vil føre til at grundvandsforurening i større grad tolereres i andre områder	<ul style="list-style-type: none">• zonerung forstået som kortlægning kan styrke det planlægningsmæssige grundlag idet særligt sårbare områder identificeres• oprydning- og beskyttelsesindsatsen kan gøres så effektiv som muligt• det er urealistisk at indføre yderligere restriktioner overalt

4.1.1 nitratfølsomme områder

Når det gælder nitrat, er vidensgrundlaget i dag til stede til en afgrænsning af de områder som er sårbare og hvor reduktionskapaciteten til omdannelse af nitrat i umættet zone og dæklag er ringe. Alt grundvand er således ikke lige sårbart i forhold til nitrat og der findes tilgængelige metoder til en detaljeret kortlægning af f.eks. områder med begrænset lertykkelse. På grund af nitratbelastningens karakter som en fladebelastning og en målsætning om højst 25 mg nitrat/l i grundvandet, er der fagligt set gode argumenter for at udpege særlige sårbarhedszoner i forhold til nitrat, idet der er en realistisk chance for at en sådan indsats vil kunne opfylde målet, også selv om der fortsat er en vis usikkerhed på om det er de mest sårbare arealer der faktisk udpeges, på grund af forekomsten af sprækker og sandvinduer, som ikke kan kortlægges med f.eks. geofysisk metoder

4.1.2 pesticidfølsomme områder

For pesticider er problemet mere komplekst. For det første er vidensgrundlaget ikke til stede i dag til en afgrænsning af følsomme områder. Det store antal forskellige pesticider incl. nedbrydningsprodukter forudsætter viden om et stor antal stoffers eller stofgrupperes transportegenskaber og nedbrydning i grundvand. Indtil denne viden foreligger vurderes de hydrauliske metoder at være brugbare til en indledende vurdering af de arealer som evt. kan være særligt følsomme. De hydrauliske metoder kan bestå af en afgrænsning af indstrømnings- og udstrømningsområder, inden for områder med særlige drikkevandsinteresser eller

en afgrænsning af indvindingsoplande og infiltrationsområder til vandværker. Derudover kan en vurdering af arealdistribueret grundvandsdannelse eller transporttid gennem dæklag for visse typer pesticider være relevant. En nærmere kortlægning i forhold til pesticidfølsomhed vil forudsætte et andet koncept end i forhold til nitratfølsomhed. I første omgang vil en kortlægning af mulighed for præferentiel strømning i ler være central, såvel i de øverste jordlag som i dybere jordlag. Dernæst vil en kortlægning af de allerøverste jordlag (0-1 m) hvor langt den største del af nedbrydningen af pesticider foregår være nødvendig. Endelig har indhold af organisk stof, redoxforhold og kalkindhold (surhed) central betydning.

4.1.3 behov for ensartede metoder

I det omfang det er muligt, må det anses for hensigtsmæssigt, af hensyn til sammenlignelighed forskellige områder imellem, at der - uafhængigt af metode - anvendes de samme hydrogeologiske principper til afgrænsningen af de enkelte beskyttelseszoner.

Når det gælder zoneringsmetoder kan man skelne mellem:

- lokalspecifikke forhold
- regionale og dynamiske forhold

De lokalspecifikke forhold omfatter bl.a. jordbundsforhold, beskaffenhed af umættet zone, dæklag og magasinforhold.

De regionale og dynamiske forhold vedrører de tidlige og geografiske variationer i nedbør, fordampning, nedsivning, afstrømning og grundvandsdannelse. Hertil kommer placeringen i forhold til indstrømnings- og udstrømningsområder. Endelig har vandindvindingsstruktur og forhold en særlig betydning.

Følgende hydrogeologiske *principper* som kan anvendes til zoneopdeling er behandlet her:

- 1) lertykkelseskort (evt. akkumulerede lertykkelseskort)
- 2) grundvandets trykforhold: infiltrationsområder / udstrømningsområder
2A) miljøfremmede stoffer (udstrømning/nedsivning)
2B) naturligt forekommende stoffer (arealdistribueret nedsivning)
- 3) transporttid gennem dæklag: inert stof
- 4) simple stofs specifikke forhold i dæklag: nedbrydning (nitrat), sorption/mobilitet (tungmetaller)
- 5) stofs specifik transporttid i dæklag: densitet (DNAPL), sorption/mobilitet (PAH, cyanid)

Som beskrevet i foregående afsnit, er lertykkelseskort eller akkumulerede lertykkelseskort en hidtil ofte anvendt metode til sårbarhedskortlægning. Zonering har til formål at kortlægge såvel grundvandsmagasinsystemet som dets beskyttelse. En zonering alene baseret på lertykkelseskort, som ikke beskriver grundvandsdannelsen og strømningsforhold i det samlede grundvandsmagasinsystem vurderes ikke tilstrækkelig, idet fastlæggelse af f.eks. indvindingsoplande til vandværker, forudsætter en nærmere kortlægning af det samlede grundvandsmagasinsystem, herunder eventuelle dæklags nærmere hydrauliske og evt. geokemiske karakteristika. Zonering alene baseret på lertykkelseskort er derfor ikke behandlet i det følgende da metoden ikke vurderes fyldestgørende. Omvendt vil en kortlægning af f.eks. lertykkelser og disses hydrauliske karakteristika typisk være et væsentligt delelement i opstilling af en geologisk eller hydrologisk model.

Zonering efter ovenstående principper 2-5 beskrives i det følgende under anvendelse af henholdsvis simple metoder og grundvandsmodeller. I kapitel 7 er der foretaget en nærmere afprøvning af principperne 2-3 for 3 udvalgte områder. Principperne 4-5 vurderes ikke fuldt operationelle på regional skala og er derfor ikke nærmere afprøvet. I kapitel 5 diskuteres de specielle forhold der knytter sig til zonering af indvindingsoplande, herunder selve afgrænsningen af indvindingsoplandet.

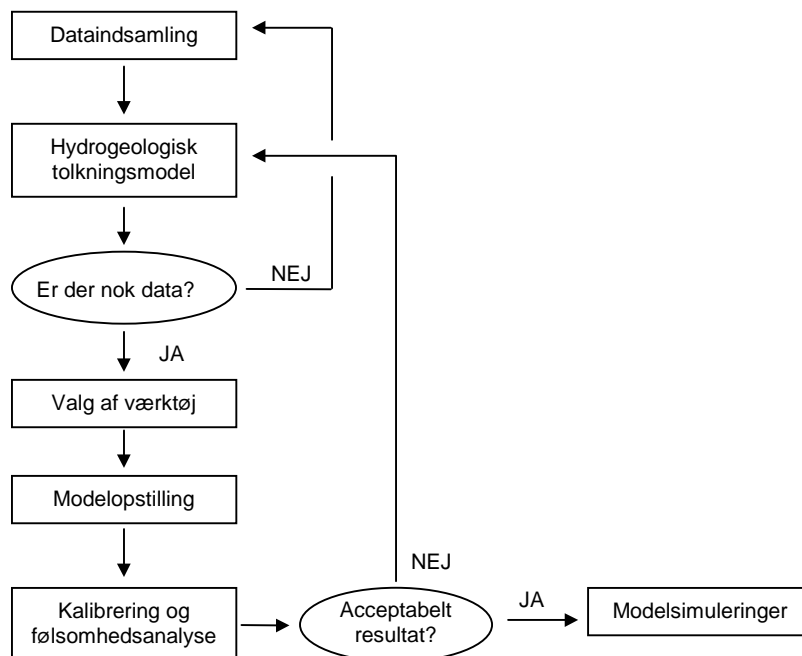
4.2 Generelle forhold omkring datainput til temakort

4.2.1 Generelle forhold omkring datainput til temakort

Zonering baseret på temakort forudsætter anvendelse af Geografiske Informations Systemer (GIS) til at sammenholde af oplysninger af forskellig art, ligesom resultatet af zoneringen herved kan sammenholdes med f.eks. arealanvendelsen og det øvrige planlægningsmæssige grundlag (Andersen & Bliksted, 1997).

4.2.2 Generelle forhold omkring datainput til grundvandsmodeller

Ved anvendelse af grundvandsmodeller vil der, uanset hvilke zoneringsprincipper der anvendes, være nogle generelle krav til datainput til modellen. Opsætning og kalibrering af grundvandsmodeller kræver kendskab til og inputdata for geologisk lagfølge og struktur, horisontal (og vertikal) hydraulisk ledningsevne for de enkelte geologiske lag og linser, magasinental (porøsitet), infiltration (nettonedbør), oppumpninger, vandløbsafstrømninger samt grundvandets trykniveau i et eller flere magasiner, herunder randbetingelser (se figur 4.1).



Figur 4.1 Procedure for opstilling af grundvandsmodel

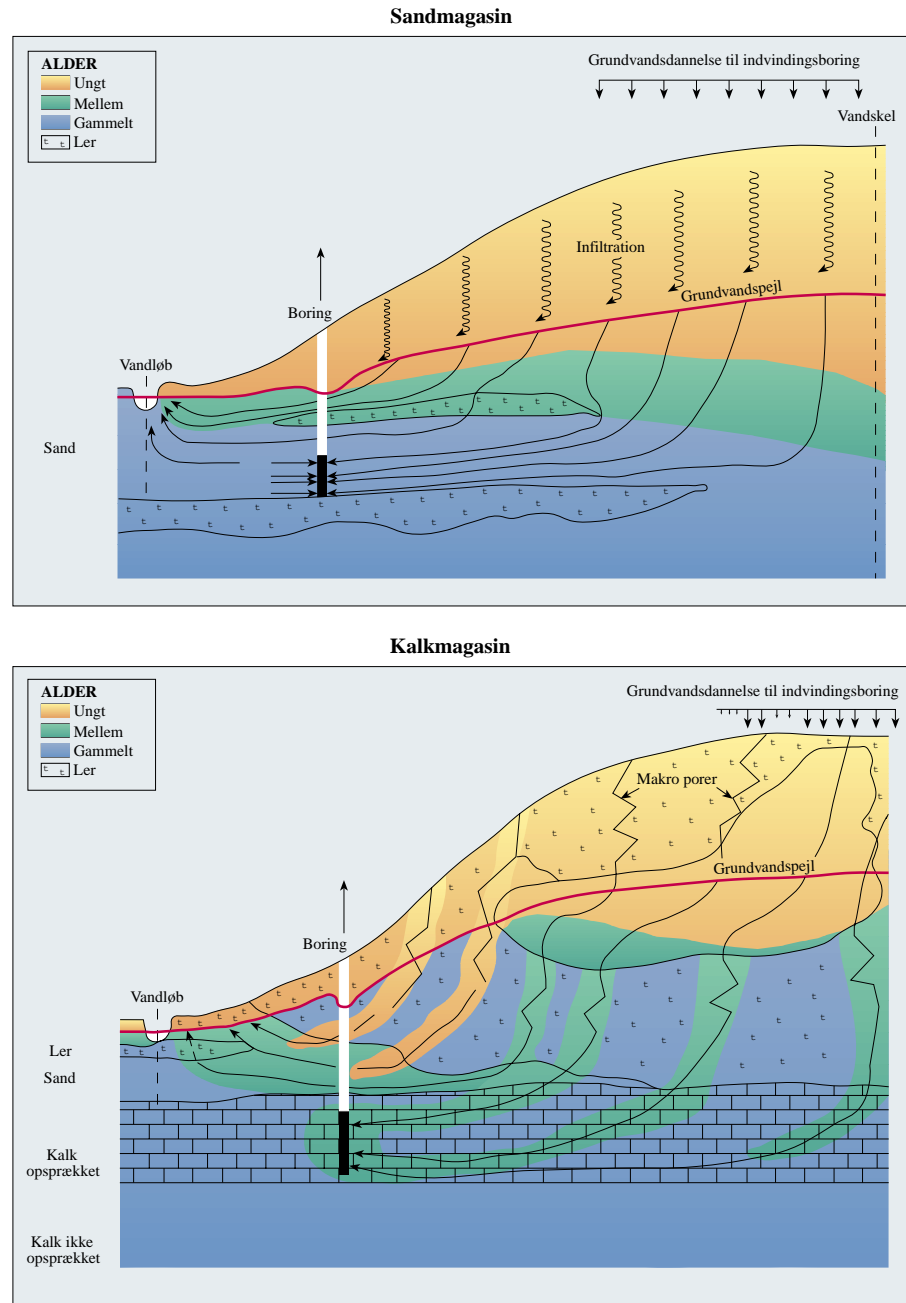
4.3 Grundvandets trykforhold

Zoneopdeling ud fra grundvandets strømningsveje må tage udgangspunkt i grundvandets trykforhold, horisontalt såvel som vertikalt.

Kendskabet til de grundvandsdannende områders beliggenhed er et afgørende forhold ved vurdering af et grundvandsmagasins risiko for at blive forurenet med stoffer, deponeret eller anvendt på jordoverfladen. Grundvandsdannende områder er defineret som områder inden for hvilke infiltrerende regnvand på et tidspunkt vil strømme gennem mindst et grundvandsmagasin inden det ender i vandløb, søer, fjorde eller i havet (figur 4.2). I grundvandsdannende områder er der en nedadrettet vandbevægelse.

Udstrømningsområder er områder hvor der er en opadrettet vandbevægelse i et magasin, hvor et artesisisk magasin har et grundvandspotentiale over terræn eller hvor der er en opadrettet vandbevægelse mellem magasiner. Udstrømningsområder vil under danske forhold typisk forekomme ved vandløb, vådområder, søer, fjorde og ved havet.

Infiltration af forurenat vand i de grundvandsdannende områder ved vandskel giver maksimal risiko for at få forureningen spredt til store dele af grundvandsmagasinet. Områder omkring vandløb, fjorde og kyster vil ofte være udstrømningsområder, med begrænset risiko for forurening af grundvandsmagasiner.



Figur 4.2 Grundvandsdannende områder for to typeområder (GEUS, 1995)

4.3.1 Temakortbaseret

På grundlag af kort over det enkelte grundvandsmagasins og dæklags horisontale grundvandspotentialer kan trykniveauforskelle vertikalt mellem adskilte magasiner og dæklag

bestemmes. Dermed kan infiltrationsområder og udstrømningsområder afgrænses. Eventuelt kan en tredje intermediær zone eller usikkerhedszone afgrænses hvor den vertikale gradientens retning enten er usikker eller vekslende mellem opad- og nedadrettet som følge af variationer i vandindvindingen eller klimaforhold.

4.3.2 Modelbaseret

Tredimensionale (3-D) grundvandsmodeller er i høj grad baseret på netop at beskrive grundvandets strømning i og mellem grundvandsførende lag. Modellerne bygges normalt op omkring en hydrogeologisk tolkningsmodel bestående af flere adskilte vandførende geologiske lag. Modeloutput vil blandt andet være et arealdistribueret grundvandspotentialer for de enkelte lag. Afhængigt af hvor avanceret den enkelte model er, kan udstrømning til vandløb, vådområder, søer, fjorde og havet beskrives og analyseres mere eller mindre fyldestgørende.

3-D grundvandsmodeller er desuden velegnede til vurdering af betydningen af ændringer i vandindvinding, nedbør osv. for grundvandets strømningsforhold.

To dimensionale modeller (2-D) kan kun i begrænset omfang anvendes til bestemmelse af infiltrationsområder og udstrømningsområder.

I visse 2-D grundvandsmodeller, som beskriver grundvandets horisontale strømning, er det muligt at distribuere grundvandsdannelsen, ligesom der kan arbejdes med vekslende frie og artesiske forhold. Dermed er det muligt at analysere udstrækningen af infiltrationsområder.

2-D grundvandsmodeller som beskriver grundvandets vertikale strømning, er velegnet til i et profil at beskrive grundvandets dannelse og strømning mellem magasiner og til f.eks. vandløb, men arealdistribueringen mangler.

4.3.3 Diskussion "Grundvandets trykforhold"

Vurderinger af grundvandets trykforhold, og dermed grundvandets strømningsmønster, er vigtig for vurderinger af i hvilket omfang vand fra en given forureningskilde vil være i stand til at infiltrere et givent grundvandsmagasin.

Kendskabet til grundvandets trykforhold kan anvendes til at afgrænse infiltrationsområder (grundvandsdannende områder) og udstrømningsområder. Eventuelt kan en intermediær zone 'usikkerhedszone' afgrænses.

Ændringer i vandindvindingsforhold og vinternedbør påvirker grundvandets trykforhold og kan betyde at et område ændrer karakter fra udstrømningsområde til infiltrationsområde. Dermed ændres grundlaget for zoneafgrænsningen, hvilket kan være uheldigt ud fra et planlægnings- og prioriteringssynspunkt (Miljøstyrelsen, 1995b). Ændringer i grundvandspejlet kan desuden medføre særlige problemer med vandkvaliteten jf. det Strategiske Miljøforsknings Program (Grundvandsgruppen, 1997). Dynamiske grundvandsmodeller er konstruerede til at kunne håndtere tidlige variationer i grundvandets trykforhold hvorimod GIS temakort ikke kan håndtere denne dynamik.

4.4 Transporttid

Zonering ud fra transporttiden gennem dæklagene for et konservativt stof (inert stof) er på sin vis blot en kvantificering af sårbarhedskortlægning på grundlag af en kombination af lertykkelser, grundvandsdannelse og hydrauliske forhold i dæklagene (bl.a. porøsitet).

Transporttiden er et mål for den generelle naturlige beskyttelse fordi: (1) det er en veldefineret fysisk parameter, (2) transporttiden har stor betydning for muligheden for sorption, nedbrydning og dispersion af en given forurening, (3) transporttiden indeholder et 'indbyg-

get' eller indirekte mål for grundvandsdannelse eller for betydningen af f.eks. vertikal trykniveaugradient, (4) transporttiden kan være en relevant parameter i forbindelse med oprydning i forhold til depoter, men også med henblik på vurderinger af hvornår en given ændring i grundvandskvaliteten kan forventes f.eks. efter at arealanvendelsen er ændret fra landbrug til skov, (5) det er fordelagtigt at benytte en metodik som kan gennemføres såvel med simple metoder (temakort) som med modelbaseret metode.

Metoden kan indeholde dels en generel del hvor transporttiden vurderes for et konservativt / inert stof, f.eks. klorid, beskrevet i afsnit 4.2.1 og 4.2.2, og dels en stofs specifik del hvor stofs specifikke transporttid med hensyn til sorption og nedbrydning (retardation) indregnes, som beskrives i afsnit 4.4.1 og 4.4.2.

4.4.1 Temakortbaseret

Metoden er i sin simple form baseret på stempelstrømning og standardværdier for infiltration / nettonedbør, vandindhold / markkapacitet (umættet zone), effektiv porøsitet (mættet zone) og tykkelse af geologiske lag (Kelstrup, 1984; Bengtsson, 1996).

Princippet er at dæklagene over det aktuelle grundvandsmagasin først deles i en umættet del og en vandmættet del. Derefter foretages en opdeling i geologiske lag med ens vandindhold / markkapacitet (umættet zone) eller ens porøsitet (mættet zone). Tykkelsen af de enkelte lag bestemmes i hele det aktuelle område.

Den samlede transporttid fra terræn til top af grundvandsmagasin bestemmes herefter som en sum af transporttiderne udregnet for hvert enkelt dæklag. Transporttiden for lag n i den umættede zone beregnes som:

$$t_{u,n} = \frac{W_{u,n} * l}{I} \text{ år}$$

hvor $t_{u,n}$ er perkolationstiden gennem lag n (umættede zone), i år
 $W_{u,n}$ er vandindholdet ved markkapacitet i lag n (umættede zone), dimensionsløs
 l er tykkelsen af lag n, i meter
 I er den årlige infiltration, i meter/år

Perkolationstiden for lag n i den mættede zone, $t_{m,n}$, beregnes efter samme formel, men $W_{u,n}$ erstattes med $X_{m,n}$ (porøsitet af lag n).

Den beskrevne metode til beregning af transporttiden gennem dæklag er en meget forenklet beskrivelse af de reelle transportprocesser. Disse forhold er nærmere diskuteret i Kelstrup (1984), Kelstrup et al. (1984), Bengtsson (1996) og resumeret i Appendix 1.

Som tidligere nævnt vil forekomst af sprækker, makroporer og sandvinduer i lerlag, eller præferentiel strømning i sandlag bevirke at perkolationstiden i praksis kan variere endog meget betragteligt inden for en mere lokal skala. I de konkrete tilfælde må man derfor søge at tage hensyn til disse forhold ved vurdering af perkolationstid.

Drejer det sig om opsprækkede morænelerslag over i øvrigt homogene morænelerslag af større tykkelse og regional udbredelse, kan man eksempelvis se helt bort fra den opsprækkede lagtykkelse i vurdering (i det det antages at perkolationen gennem den opsprækkede zone sker med relativt hurtigt gennembrud).

Drejer det sig om glacialtektoniske forstyrrelser er løsningen at visse områder med sådanne forstyrrelser fremhæves på perkulationskortet f.eks. med en speciel signatur. I sådanne områder må man derfor antage at den naturlige beskyttelse er ringe, således at området er særligt sårbart overfor udvaskning af stoffer.

Forsøg på at dokumentere perkolationstider yderligere, herunder hvorvidt der forekommer f.eks. udpræget horisontal strømning med yngre vand under øvre magasiner med ældre vand kan bedst gennemføres gennem aldersdatering af grundvandet enten ved CFC analyser eller andre metoder.

4.4.2 Modelbaseret

Ved anvendelse af grundvandsmodeller til beregning af perkolationstiden fra terræn til top af grundvandsmagasin vil det, afhængigt af inddatakvaliteten, i langt højere grad være muligt at tage højde for / indregne den rumlige variation i strømningsforholdene og dermed komme udover mange af de forenklinger og antagelser der gøres i forbindelse med stempelstrømningsmetoden (Appendix 1). Ved kalibrering og verificering af modellen (kan) sikres en rimelig overensstemmelse mellem model og faktiske forhold. Partikelhastigheder i såvel umættet som mættet zone vil i løbet af de nærmeste 1-2 år kunne simuleres med tilgængelige modelværktøjer.

Modelteknisk er der således ikke nogen begrænsninger for at gennemføre en komplet modelbaseret analyse af transporttider fra terræn til f.eks. top af primært grundvandsmagasin, med beskrivelse af transporttid såvel i umættet zone som gennem f.eks. øvre sekundære magasiner til top af primært magasin. I praksis kan forholdene imidlertid være så heterogene og komplekse at en modelbaseret analyse ikke vil kunne gennemføres som følge af for store usikkerheder på den geologiske model. Det vil ved meget forstyrrede geologiske forhold ikke være muligt at tilvejebringe et tilstrækkeligt datagrundlag til en modelbaseret analyse.

4.4.3 Diskussion "Transporttid gennem dæklag; inert stof"

Metoden er primært anvendelig i forbindelse med prioritering af oprydningsindsatsen overfor eksisterende punktforureninger og i forbindelse med planlægning af fremtidig placering af potentielle punktforureningskilder idet transporttiden er identisk med reaktionstiden for en eventuel forurening.

Inputparametre til metoden udgøres som nævnt af nedsivningens størrelse (i forskellig dybde) samt porøsitetens størrelse. Et væsentligt problem er fastsættelsen af porøsitetens størrelse (Bengtsson, 1996; Kelstrup, 1984), ligesom en mere præcis arealdistribueret nedsivning til forskellige dybder vil forudsætte en 3D grundvandsmodel. Metoden kan dog gennemføres med antagelse af konstant grundvandsdannelse. Betydningen af simpel kontra modelbaseret metode belyses nærmere ved eksemplerne.

4.5 Simple stofs specifikke forhold

Zonering ud fra stofs specifikke forhold for nitrat og tungmetaller kan være relevant, idet reduktionen af nitrat og sorption af tungmetaller i mindre grad er afhængig af transporttiden gennem dæklag ved de grundvandsstrømnings hastigheder som er almindelige under danske forhold. Reduktion og sorption af henholdsvis nitrat og tungmetaller er primært under disse forhold afhængig af det geokemiske miljø som det forurenede vand strømmer gennem (redoxforhold, pH, pyriholdige lag etc.).

Der er imidlertid stor forskel på nitrat og tungmetallers opførsel i jord og grundvand. Nitrat har større opløselighed end tungmetaller i vand. Tungmetallers transport er i høj grad kontrolleret af pH, dette er ikke tilfældet for nitrat. Nitrat kan optages i planter, hvor tungmetaller kan adsorberes i rodzonen. Nitrat har begrænset nedbrydning i aerob zone, tungmetaller er persistente i jord- og grundvand.

Pesticider har en relativ lav opløselighed i vand og transporten er kun i begrænset grad pH kontrolleret. Pesticider kan adsorberes i rodzonen og nedbrydeligheden i jord og grundvand er varierende.

Olie og benzinformbindelser har relativ lav opløselighed i vand. Stofferne kan transporteres som fri fase (ikke opløst vædske fase). Transporten er ikke pH kontrolleret. Forbindelserne kan adsorberes i rodzonen og nedbrydeligheden i jord og grundvand er varierende.

Opløseligheden i vand er lav og stofferne kan transporteres som ikke opløst vædske fase. Stofferne er ikke pH kontrolleret. Der kan være adsorption i rodzonen og stofferne er kun i begrænset omfang nedbrydelige i jord og grundvand.

4.5.1 Temakortbaseret

En afgrænsning af områder hvor grundvandsmagasinet er sårbart over for nedsivende nitrat kræver en kortlægning af redoxgrænsens beliggenhed i forhold til toppen af magasinet og et kort over de områder hvor grundvandsdannelsen til det pågældende magasin finder sted. Et eksempel på nitratsårbarhedskortlægning er vist i Miljøstyrelsen (1995e).

Tilsvarende for tungmetaller må pH i umættet zone kortlægges.

Desuden kan temakort over nettonedbørens størrelse i infiltrationsområder (og 'intermediære områder') anvendes til vurdering af fortyndingsgraden af f.eks. en arealbelastning med nitrat eller pesticider. Dermed kan den resulterende udvaskning skønnes. I Miljøstyrelsen (1995f) er vist et eksempel på en arealdistribueret beregning af den maksimalt tilladelige nitratudvaskning i forhold til drikkevandskravet på 50 mg NO₃/l.

4.5.2 Modelbaseret

Zoneringen kan gennemføres f.eks. ved hjælp af DAISY - MIKE SHE modellen. Procesforståelsen er når det gælder nitrat og pH til stede, og disse er implementeret i modelværktøjer. Skiftet fra oxiderende til reducerende forhold vil kunne kortlægges ud fra allerede eksisterende farvebeskrivelser af boringer, men supplerende boringer og udtagning af vandprøver til kemisk bestemmelse af redox aktive komponenter, og farvebestemmelser på sedimenterne med henblik på nærmere kortlægning af redoxfronten kan være nødvendig. Kortlægning af pyritforekomster og evt. reducerende forhold som følge af methan opstigning kan være påkrævet. Endelig er det i morænelersområder nødvendigt at have styr på sprækker og sandvinduer, herunder reduktion af nitrat i sprækker (som afhænger af redoxforhold i sprækkerne).

Når det gælder pesticider forventes procesforståelse og modelværktøjer først operationelle om nogle år (tidligst ca. 5 år) for udvalgte modelstoffer. Det er dog sandsynligt at disse modeller vil forudsætte yderligere dataindsamling.

4.5.3 Diskussion af 'simple stofspecifikke forhold'

Der er i dag en viden om at grundvandets redoxforhold er langt mere komplekse end tidligere antaget og afgørende for de vandkvalitetsstyrende processer. Kortlægning af redoxforhold kan gennemføres på regional skala, men på lokalt niveau (f.eks. markniveau) vurderes en sådan kortlægning ikke umiddelbart gennemførlig med en tilstrækkelig præcision uden indsamling af yderligere data (dvs. etablering af bl.a. boringer med mulighed for udtagning af vandprøver og sediment).

Brugen af stoftransportmodeller vil derfor forudsætte at der er tale om en meget vigtig vandressource, som er truet af nitratforurening, eller at der er behov for at tilvejebringe en bedre forståelse af f.eks. sammenhængen mellem overudnyttelse af ressourcen som følge af vandindvinding og nitratindholdet i f.eks. råvandet til en større kildeplads.

I de fleste tilfælde vil en operationel løsning kunne baseres på en strømningsmodellering med 3D model evt. med en forenklet stoftransportmodellering 'on/off' (f.eks. baseret på partikelbanebeskrivelse kombineret med temakort over f.eks. redoxfrontens beliggenhed).

Herved kan områder der er særligt sårbare og som bidrager til nitratindholdet i f.eks. en indvindingsboring søges vurderet primært ud fra eksisterende data.

4.6 Sorption / nedbrydning, densitetsstrømning

Forureningskomponenters opførsel i jord- og grundvand vil være påvirket af en lang række grundlæggende fysisk-kemiske processer, som kendes fra jord- og vandkemien. Det drejer sig om syre-base reaktioner, luft-vand ligevægte, udfældnings- og opløsningsreaktioner, kompleksdannelse i vandfasen, ionbytning samt sorption til partikeloverflader (evt. kolloider). Derudover kan der ske faseovergange mellem f.eks. poreluften (gasfase) og opløst i porevandet (vandfase).

Redoxprocesser som beskrevet ovenfor for nitrat og nedbrydning udgør vigtige processer for mange stoffer. For visse stoffer er det vigtigt at skelne mellem dem der er lettere end vand og dem der er tungere end vand, f.eks. ved spild af olie og brændstof (Miljøstyrelsen, 1996).

4.6.1 Temakortbaseret

Simple metoder til vurdering af transporttid i dæklag vil udelukkende kunne omfatte et skøn af parameteren: 'retardation' som er et simpelt mål for på hvilken måde sorption og nedbrydning 'forsinker' stofudbredelsen i forhold til et konservativt stof som ikke nedbrydes eller adsorberes til jorden. Retardation kunne relativt let multipliceres på beregnede transporttider for konservative stoffer.

Transporttid af stoffer som styres af densitet, kolloidtransport mm. kan ikke vurderes med simple metoder.

4.6.2 Modelbaseret

Opløste stoffer kan modelleres, men forudsætter mere detaljerede input vedrørende såvel geokemiske forhold, strømningsforhold og sorption/-nedbrydning, som måtte have betydning i det konkrete tilfælde (stofs specifikt og afhængigt af hydrogeologi). Der vil formentlig være behov for yderligere data vedrørende sorption og nedbrydning i jord og grundvand fra feltstudier, evt. kombineret med f.eks. laboratorieforsøg.

4.6.3 Diskussion af 'sorption og nedbrydning'

Anvendelse af modeller til vurdering af sorption og nedbrydning af f.eks. pesticider eller andre miljøfremmede stoffer i forbindelse med zoneringsmetoder er ikke operationelt i dag. Vidensgrundlaget forventes først tilvejebragt om tidligst ca. 5 år.

4.7 Konklusion vedrørende zoneringsmetoder

De metoder der i dag må anses for at være operationelle består af zoneringsmetoder med udgangspunkt i grundvandets trykforhold (infiltrations- og udstrømningsområder), den arealdistribuerede grundvandsdannelse og transporttider gennem dæklag (perkolationstid). Disse forhold kan kortlægges ved såvel simple metoder som baseret på hydrologiske modeller eller grundvandsmodeller.

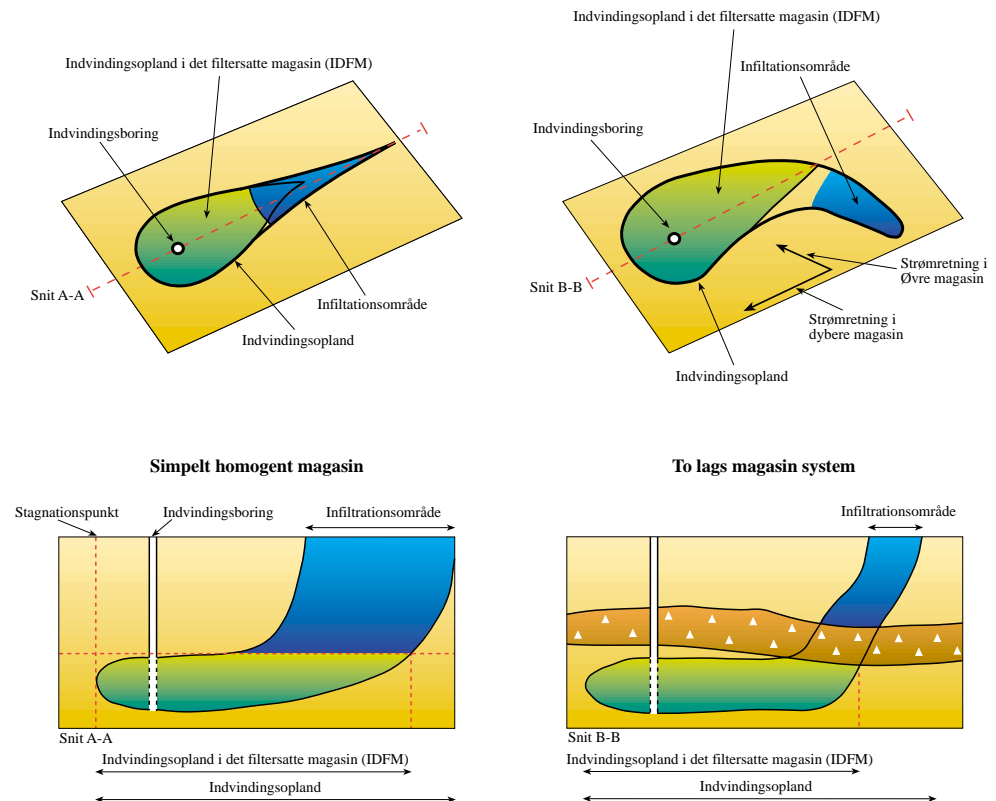
En zoneringsmetode alene baseret på lertykkelseskort, som ikke beskriver grundvandsdannelsen og strømningsforhold i det samlede grundvandsmagasinsystem vurderes utilstrækkelig. Fastlæggelse af f.eks. indvindingsoplande til vandboringer, forudsætter en nærmere kortlægning af det samlede grundvandsmagasinsystem, herunder eventuelle dæklags nærmere hydrauliske

ske og geokemiske karakteristika. Zonering alene baseret på lertykkelseskort er derfor ikke behandlet i det følgende da metoden ikke vurderes fyldestgørende. Omvendt vil en kortlægning af f.eks. lertykkelser og disses hydrauliske og geokemiske karakteristika typisk være et væsentligt delement i opstilling af en geologisk eller hydrologisk model, ligesom at en nærmere afgrænsning af de vandførende lags udbredelse og egenskaber vil være relevant med henblik på at forstå grundvandsmagasinet og dets beskyttelse.

Videngrundlaget til stofspecifik vurdering af udbredelsen af nitrat og tungmetaller i grundvand er til stede i dag. Det samme er modelværktøjer. Det vurderes imidlertid at en egentlig modellering normalt vil forudsætte indsamling af supplerende data og derfor i de fleste tilfælde næppe vil være operationel, bortset fra i et mere begrænset omfang for udvalgte områder. Når det gælder miljøfremmede stoffer (f.eks. pesticider) er videngrundlaget ikke til stede i dag, og vil tidligst være det om ca. 5 år (dvs. ikke operationelt).

5 Afgrænsning af indvindingsoplande og infiltrationsområder

En afgrænsning af "indvindingszonen" omfatter en nærmere vurdering af den arealmæssige udstrækning af *indvindingsoplandene* til konkrete vandværker, samt en afgrænsning af *infiltrationsområderne* hvor grundvandsdannelsen til de pågældende vandværkers indvindingsoplande finder sted (se figur 5.1).



Figur 5.1 Definition af "indvindingsopland", "infiltrationsområde" og "indvindingsopland i det filtersatte magasin (IDFM)"

Inden for områder med særlige drikkevandsinteresser har en korrekt afgrænsning af indvindingsoplande og infiltrationsområder sekundær betydning, i forhold til en afgrænsning af de sårbare områder. Dette skyldes at hele ressourcen i princippet skal beskyttes, såvel områder med nuværende indvinding som reserveområder for fremtidig indvinding.

Uden for områder med særlige drikkevandsinteresser har en præcis afgrænsning af indvindingsoplande og infiltrationsområder derimod en mere central betydning, idet indsatsen her skal koncentreres i forhold til nuværende vandindvindingsinteresser/kildepladser.

Effektiviteten af indsatsen overfor sårbare dele af infiltrationsområdet til vandindvindinger uden for områder med særlige drikkevandsinteresser afhænger dermed af den præcision ved hvilken den geografiske udstrækning af infiltrationsområdet kan afgrænses. Ud fra en kontinuitetsbetragtning og ud fra et kendskab til grundvandsdannelsens størrelse (R) (f.eks. med udgangspunkt i nettonedbøren) samt vandindvindingens størrelse (Q) kan det samlede areal af infiltrationsområdet ($A_{infil.}$) bestemmes:

$$A_{\text{infiltr.}} = Q / R$$

Formen af infiltrationsområdet afhænger imidlertid af magasinsystemets opbygning, den effektive hydrauliske ledningsevne for de enkelte vandførende og lavpermeable lag samt boringens filtersætningen. Derudover kan formen afhænge af placeringen af øvrige vandindvindinger i området, samt placeringen af vandløb, vandskel og øvrige randbetingelser. Hvis grundvandsdannelsen varierer rumligt bliver formen på infiltrationsområdet mere kompleks.

Afgrænsningen af infiltrationsområdet sker normalt med udgangspunkt i indvindingsboringen/mængden og en vurdering af det tilhørende indvindingsopland i det filtersatte magasin (IDFM). Udgangspunktet er et skøn af transmissivitet og gradient for det magasin indvindingen er filtersat. Simple metoder til vurdering af IDFM er beskrevet i (Miljøstyrelsen, 1995c) hvor en række eksempler er givet. Problemet er imidlertid at disse metoder kun i meget simple tilfælde er brugbare til en fastlæggelse af infiltrationsområdet, dvs. en projicering af IDFM op til terræn (jf. figur 5.1 hvor infiltrationsområdet er beliggende helt uden for IDFM-området, som man ud fra simple metode har mulighed for at afgrænse).

Ofte anvendes begrebet indvindingsopland til at beskrive det areal man i praksis kan afgrænse ud fra transmissivitet, gradient for grundvandspejl og indvindingsmængde jf. metoderne i (Miljøstyrelsen, 1995c), dvs. med udgangspunkt i vurdering af f.eks. stagnationspunkt, oplandsbredde ved boring og asymptotisk oplandsbredde opstrøms boringen. Denne del af indvindingsoplandet betegnes jf. figur 5.1 som "indvindingsoplandet i det filtersatte magasin (IDFM)". Dette opland udgør, afhængigt af hvor komplekse magasinforholdene er, kun en delmængde af infiltrationsområdet eller evt. slet ikke infiltrationsområdet. Infiltrationsområdet udgør således det område ved terræn der i praksis føder den pågældende indvinding, og som derfor har størst interesse i forbindelse med vurdering af grundvandsbeskyttelsen/zonering.

5.1 Afgrænsning af indvindingsoplandet i det filtersatte magasin

Grænsen for indvindingsoplandet i det filtersatte magasin, herefter IDFM, udgør ikke nødvendigvis den ydre grænse for det areal det er relevant at beskytte af hensyn til den aktuelle indvinding.

Som det fremgår af figur 5.1, ligger infiltrationsområdet helt uden for IDFM i det komplekse tilfælde. For simple magasintilfælde, f.eks. et homogent magasin, vil der være en større grad af overlap mellem IDFM og indvindingsoplandet, selvom en del af infiltrationsområdet kan være beliggende opstrøms IDFM. Såfremt IDFM imidlertid udvides med en sikkerhedszone og føres helt til opstrøms grundvandskel, kan man i simple tilfælde foretage en afgrænsning af det samlede indvindingsopland som helt dækker infiltrationsområdet.

Denne sikkerhedszone er relevant dels på grund af den usikkerhed der, uanset metode, vil være forbundet med afgrænsningen af infiltrationsområdet, og dels for at tage højde for eventuelle variationer i indvindingsmængde, indvindingsstrategi, nedbørsforhold etc.

En afgrænsning af infiltrationsområdet eller hele indvindingsoplandet er ikke en statisk størrelse. I praksis udvider og indskrænker indvindingsoplandene sig afhængigt af indvindingsmængden, klimatiske variationer, arealanvendelse mm.

Ved mere komplekse magasinforhold bør sikkerhedszonen udvides yderligere så der tages hensyn til betydningen af sekundære magasiner og horisontal strømning i vandførende lag, som kan være med til at "flytte" infiltrationsområdet opstrøms i forhold til IDFM.

5.1.1 Værktøjer til afgrænsning af IDFM

Der findes forskellige værktøjer til afgrænsning af IDFM. Der kan f.eks. nævnes:

Manuelle analytiske beregningsmetoder (Miljøstyrelsen, 1995c):

- Parabelformet indvindingsopland
- Cirkulært indvindingsopland med horisontalt vandspejl
- Cirkulært indvindingsopland på grundlag af nettonedbør og oppumpning

Det er i (Miljøstyrelsen, 1995c) vurderet at usikkerheden på bestemmelsen af IDFM maksimalt er +/- 100 %, som følge af usikkerheder på de parametre der bestemmer oplandet. Såfremt der benyttes parametre ud fra kortmateriale er usikkerheden op til flere hundrede %.

Analytiske element modeller:

- WHPA (Blandford & Huyakorn, 1990)
 - WhEAM (U.S. EPA, 1987)
- TWODAN (Fitts, 1994; Strack, 1988)

Distribuerede matematiske modeller:

- MIKE SHE (DHI, 1993)
- MODFLOW / MODFLOW-P (McDonald & Harbaugh, (1988)
- FLOWPATH (Franz & Guiguer, 1990)
- PATH3D (Zheng, 1989)

5.2 Opholdstid i grundvandsmagasinet

Opholdstiden (det vil sige transporttiden) i grundvandsmagasinet er relevant for forurenninger som er let nedbrydelige (f.eks. bakterier). Beskyttelse af den del af indvindingsoplandet som ligger tættest på kildepladsen kan ske ved definition af en særlig kildepladszone, defineret i det simple tilfælde med et fast afstandskrav (f.eks. 300 m) eller med en minimum transporttidskrav til borerne (f.eks. < 60 dage), beregnet ved hjælp af en analytisk eller numerisk grundvandsmodel.

5.2.1 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 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 advektionsdispersions ligningen, 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 vandstrømnings beregningerne) 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 fore-

tage partikelsimuleringer for en længere periode ved at 'recykle' simuleringresultatet fra strømningssmodellen.

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.

5.2.2 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 strømningssfeltet, baseret på flow rater mellem de enkelte beregningsknudepunkter fra strømningssmodellen (Hsieh and Freckleton, 1993).

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.

5.2.3 Begrænsninger ved numeriske modeller

Såvel MIKE SHE som MODPATH har forskellige begrænsninger som forudsættes forstået bl.a. (1) tilgrundliggende antagelse i partikelbanesimuleringen, (2) diskretiseringseffekter og (3) usikkerheder i parametre og randbetingelser.

Nøjagtigheden af de numerisk beregnede partikelbaner og en korrekt fortolkningen af simuleringresultatet afhænger af i hvilken grad grundvandssystemet realistisk set kan repræsenteres af et diskret knudepunktsnet af finite differens gridceller. Graden af rumlig diskretisering i en finite differens model har indflydelse på (a) detaljeringsniveauet ved hvilken det hydrogeologiske system og randbetingelser til dette kan repræsenteres, (b) nøjagtigheden af strømningshastigheds beregningerne og (c) evnen til så præcist som muligt at repræsenterer interne 'sinks' (dvs. f.eks. indvindingsboringer). Ofte, vil en detaljeringsgrad som er tilstrækkelig for en strømningssmodellering af grundvandsressourcen ikke være tilstrækkelig detaljeret for en korrekt partikelbaneanalyse. Tidsdiskretiseringen kan ligeledes være en væsentlig fejlkilde i partikelbanesimuleringer.

Betydningen af rumlig diskretisering for repræsentationen af vandindvindinger er særligt 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.

5.2.4 Diskussion af partikelbanesimuleringer

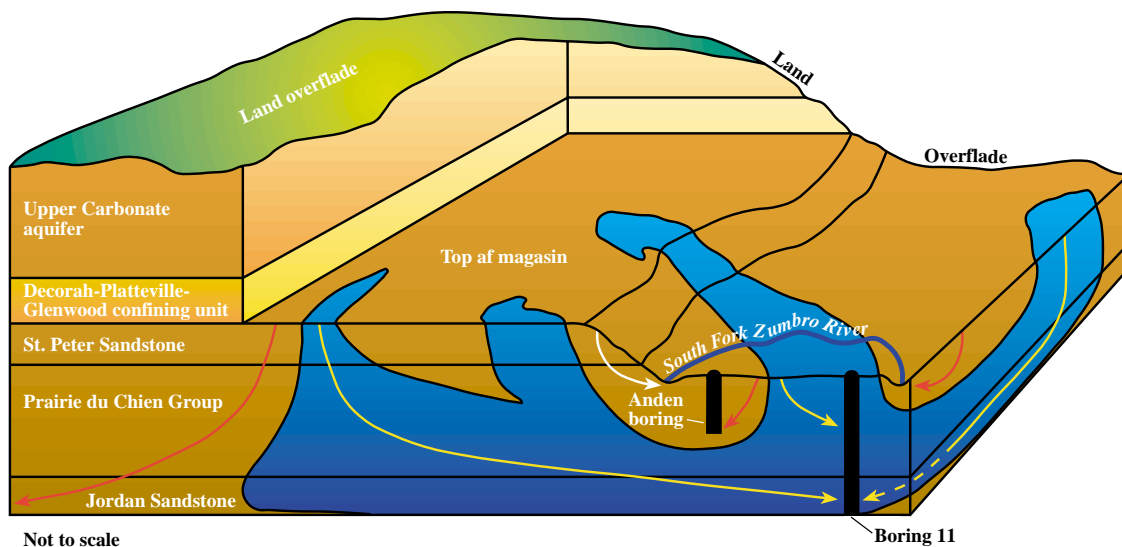
Beskyttelse af indvindingsoplande og infiltrationsområder til vandindvindinger er problematiske fordi strømlinier i et grundvandssystem ændrer sig som følge af ændringer i vandindvinding og nettonedbør, ligesom de hydrauliske egenskaber af heterogene grundvandssystemer ikke kan observeres direkte. Ud fra hypotetiske modeleksperimenter, med henblik på en nærmere forståelse af relationer mellem borer og infiltrationsområder, vurderes især variabiliteten af grundvandssystemet at have central betydning. Denne må derfor tages i betragtning i forbindelse med afgrænsning af infiltrationsområder ved hjælp af 3D-partikelbane-simuleringer (Reilly og Pollock, 1993).

Beskyttelsesstrategier som er rettet mod en beskyttelse af infiltrationsområder til indvindinger og som er baseret på en oversimplificering af grundvandssystemet er nytteløse, idet man risikere at beskytte områder som ikke bidrager til indvindingen ved en boring i stedet for en beskyttelse af de arealer der bidrager til boringen (Reilly og Pollock, 1993).

På trods af at Reilly og Pollocks analyser er baseret på forholdsvis simple magasinforhold (alluviale sandaflejringer), viser disse at randbetingelser, oppumpningsrate og filtersat interval er nøglefaktorer. Resultatet af simuleringer for 4 forskellige eksempler viste således, at infiltrationsområdet til en enkelt boring ikke nødvendigvis består af et sammenhængende område, og heller ikke nødvendigvis er placeret i nærheden af borerne. Selv for det relativt simple magasinssystem som blev analyseret, var simulerede partikelbaner til en boring meget følsom overfor randbetingelser og hydrauliske parametre for det 3-dimensionale system (Reilly og Pollock, 1993).

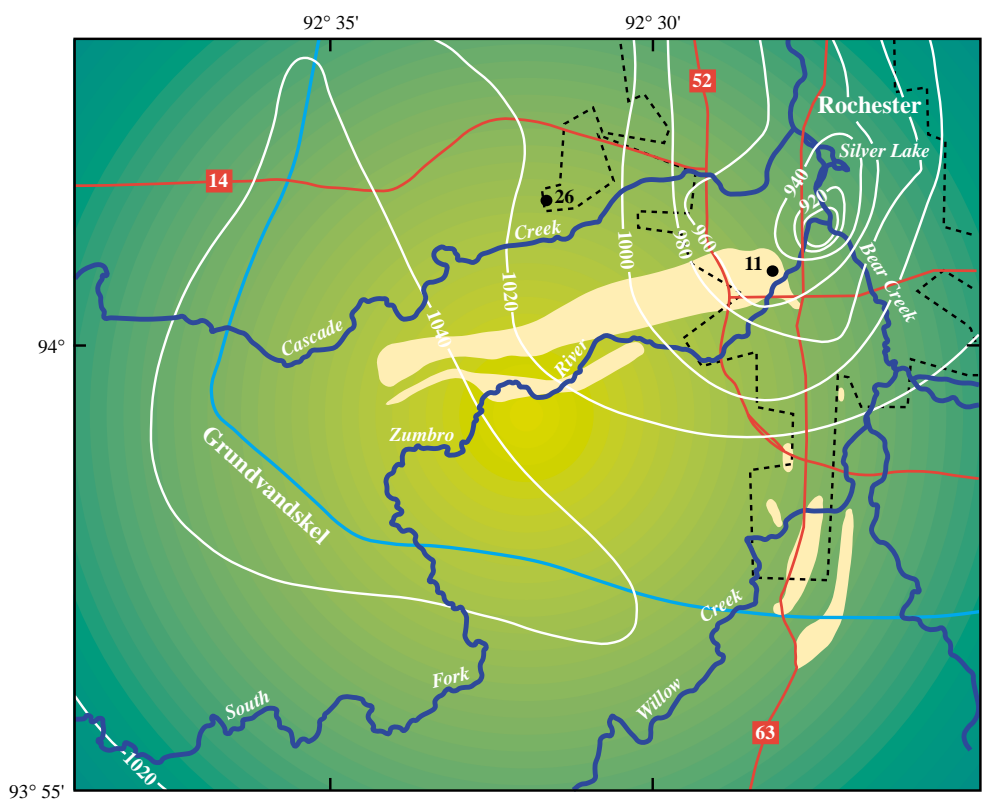
Strømning i grundvandssystemet afspejler alle de påvirkninger som er påtvunget systemet. Partikelbaner ændrer sig som følge af nye påvirkninger på systemet, selv om disse påtvinges på andre lokaliteter end omkring den boring som har interesse. Enhver beregning som har til formål at bestemme infiltrationsområder må vurdere partikelbaner for hele systemet i stedet for analysere infiltrationsområdet til en enkelt boring. Så snart der tilføjes ændrede indvindingsforhold må vurderingen af infiltrationsområder og indvindingsoplande derfor evalueres på ny (Reilly og Pollock, 1993).

Eksempler på numerisk modellering af infiltrationsområder og indvindingsoplande ved komplekse forhold er gennemført af (Delin og Almendinger, 1993) for karstforhold. Resultaterne viste, at en afgrænsning af infiltrationsområdet ved hjælp af numerisk partikelbane-model havde samme orientering (parallel med den regionale strømretning) men omfattede en signifikant forskellig afgrænsning i forhold til en hydrogeologiske kortlægning. Forskellene i de afgrænsede infiltrationsområder hænger sammen med muligheden for med en 3D numerisk model mere præcist i forhold til analytiske metoder at repræsentere: 1) det 3-dimensionale strømningssystem, 2) hydrologiske randbetingelser, bl.a. vandløb, 3) arealdistribueret grundvandsdannelse og 4) påvirkningen fra nærliggende oppumpninger (Delin og Almendinger, 1993).



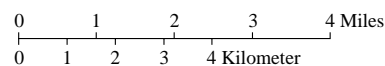
Legende

- Model beregnet indvindingsopland for boring 11
- Grundvandsstrømning til boring 11
- Anden grundvandsstrømning



Legende

- Infiltrationsområde til boring 11
- 940— Potentiale august 1987 kontur interval 20 feet
- 26 Boringsnummer



Figur 5.2 Eksempel på afgrænsning af infiltrationsområder for komplekse forhold (Delin og Almendinger, 1993).

Afgrænsning af infiltrationsområder ved analytiske metoder og hydrogeologisk kortlægning udgøres af dråbeformede indvindingsoplande (IDFM områder) der udbreder sig fra indvindingsboringen til opstrøms vandskel. I figur 5.2 er vist et eksempel fra et karstområde i Minnesota. IDFM området til boring 11 udgør i sommermåneder et areal på 13,440 acres, hvorimod dette område i vintermåneder udgør et areal på 4,100 acres. Ved hjælp af numerisk 3D model er det vurderet at infiltrationsområdet er væsentligt forskelligt fra IDFM området. Infiltrationsområdet fremtræder opsplittet i delområder og dækker et areal på ca. 2,180 acres. Denne diskontinuitet i infiltrationsområdets udstrækning skyldes dels indvindinger fra nærliggende boringer dels grundvandsafstrømning til South Fork Zumbro River. Resultaterne viser fordelene ved en numerisk 3D model ved simulering af heterogeniteter i grundvandssystemet som ikke kan evalueres ved hjælp af simple metoder (Delin og Al-mendinger, 1993).

Konklusioner

Numeriske modeller bør anvendes med stor forsigtighed i forbindelse med afgrænsning af infiltrationsområder og indvindingsoplande ved såvel simple som komplekse tilfælde på grund af de gjorte antagelser, usikkerheder og begrænsninger i en typisk numerisk strømningsmodel. Dette gælder i særdeleshed såfremt de modelberegnete infiltrationsområder skal anvendes til f.eks. regulering af arealanvendelsen. Modellerne er imidlertid nødvendige til en nærmere analyse af afgrænsningen af infiltrationsområder, idet simple metoder f.eks. baseret på analytiske løsninger, giver for usikre resultater.

Infiltrationsområderne til en kildeplads eller en boring kan kun analyseres såfremt samtlige påvirkninger af vandbalancen i et område inddrages, dvs. såvel forhold vedr. den aktuelle kildeplads/boring med hensyn til boringsplaceringer, filtersætning mm. samt påvirkninger af grundvandssystemet fra øvrige nærliggende boringer, grundvandsafstrømning til vandløb og arealdistribueret grundvandsdannelse. Partikelbaneberegninger er følsomme overfor såvel randbetingelser som grundvandssystemets heterogeniteter, dvs. en korrekt repræsentation af de hydrogeologiske forhold, hydraulisk ledningsevne, porøsitet mv. der i en 3D- grundvandsmodel er helt afgørende for resultatet af modelleringen.

6 Stokastiske metoder

Stokastiske metoder muliggør en kvantificering af usikkerheden på afgrænsningen af zoner med udgangspunkt i usikkerheder på inddata og finder anvendelse i risiko- og beslutningsanalyse (Bengtsson, 1996). I stedet for en absolut zoneafgrænsning vurderes sandsynligheden for en given afgrænsning.

6.1 Metodik

Stokastiske metoder kan anvendes jf. Figur 3.2 fra Grundfør områder ved såvel vurdering af arealdistribueret grundvandsdannelse og perkolationstid som ved afgrænsning af et indvindingsopland (Kinzelbach og Vassolo, 1996; Evers og Lerner, 1995).

Disse metoder omfatter en vurdering af såvel middelværdi som spredning på de vigtige indgående parametre ved en vurdering af f.eks. perkolationstiden ved en simple metode. En sådan vurdering vil omfatte vurdering af middelværdi, spredning og fordelingsfunktion for de indgående parametre (f.eks. tykkelse af umættet zone, placering af geologiske lag, nedrivningens størrelse, porøsitet mm.). Ved vurderingen genereres et stort antal datasæt med parameterværdier for de indgående størrelser i f.eks. beregning af perkolationstid (som følger de fastlagte sandsynlighedsfordelinger). Med disse parameterværdier gennemføres herefter beregningen af perkolationstid jf. tidligere beskrevne metoder for hvert enkelt datasæt. Sandsynligheden for at perkolationstiden fra et givent areal er mindre end f.eks. 25 år kan nu beregnes ud fra samtlige realisationer (f.eks. $N=100$). Metoden er relativ let at anvende sammen med f.eks. et GIS system og/eller et regneark (Bengtsson, 1996).

6.2 Vurdering

Fordelen ved stokastiske metoder er at man opnår en usikkerhedsvurdering af de fastlagte beskyttelseszoner eller indvindingsoplande. Dataindsamling kan derved placeres hvor der er størst usikkerhed. Selvom indsamling af yderligere data er bekostelig, kan det let vise sig 'i det lange løb' at være økonomisk fordelagtigt (Henriksen et. al, 1996).

Generelt kan form og størrelse af indvindingsoplande, herunder infiltrationsområder, ikke bestemmes eksakt på grund af den iboende usikkerhed med hensyn til hydrauliske parametre for magasinsystemet og størrelse af grundvandsdannelsen. I de tilfælde hvor datagrundlaget er begrænset, kan det derfor være en fordel at anvende stokastiske metoder til vurdering af infiltrationsområdernes variationsramme. Herved kan der enten afgrænses et infiltrationsområde som dækker samtlige realisationer eller iværksættes yderligere dataindsamling, med henblik på nærmere at afgrænse infiltrationsområdet (Kinzelbach og Vassolo, 1996; Evers og Lerner, 1995).

Stokastiske metoder muliggør en kvantificering af usikkerheden på afgrænsningen af zoner, f.eks. sårbarhedszone eller indvindingszone. Det kan herudfra vurderes om der bør indsamles flere data eller om beskyttelsesområdet skal udvides så det omfatter samtlige realisationer.

7 Afprøvning af zoneringsprincipper, simple og avancerede metoder

7.1 Introduktion til afprøvning af metoder

De ovenfor skitserede principper til afgrænsning af beskyttelseszone afprøves på 3 områder: Østfyn (Nyborgområdet), Midtjylland (Ejstrupholm) og Sydvestjylland (oplandet til Sneum-Bramming-Holsted å). De tre områder repræsenterer typiske geologiske forhold lige fra morænelandskab med kalkreservoir (Østfyn) til Hedeslette med bakkeø og miocæne reservoirer (Sydvestjylland og Midtjylland). For hvert enkelt område foreligger der en grundvandsmodel, og ved eksemplerne belyses en række forhold som er centrale i forbindelse med zonerings.

Det illustreres for hvert af de tre områder ved simple metoder i hvilke områder der er opadrettet gradient, ligesom perkolationstid til et udvalgt magasin beregnes på baggrund af de geologiske forhold og en gennemsnitsnedsivning for området som helhed.

Disse beregninger baseret på simple metoder sammenstilles med simuleringer baseret på regionale grundvandsmodeller for områderne. Det er valgt at vise simuleret grundvandspotentialer, nedsivning til det øverste grundvandsmagasin samt grundvandsdannelse til et dybere magasin. Endelig er der foretaget en beregning af perkolationstiden til et dybere magasin, med henblik på en sammenligning af en modelbaseret og en simpel beregning af perkolationstiden.

7.1.1 Valg af primært magasin

I hvert af de tre tilfælde er der foretaget en vurdering af hvad der udgør det primære magasin for vandindvinding i det pågældende område (indvinding af drikkevand fra almene vandværker). Eksempler og vurderinger er gennemført med udgangspunkt i dette magasin. I områderne udnyttes også øvre magasiner til vandindvinding, men for simpelheds skyld gennemføres beregninger udelukkende for det valgte 'modellag' som er defineret som 'primært magasin'.

I Nyborg området udgør kalken det primære magasin (en stor del af Nyborg området er i øvrigt udpeget som område med særlige drikkevandsinteresser). Imidlertid sker der også en udnyttelse af øvre kvartære sandmagasiner i området, som der skal tages hensyn til ved grundvandsbeskyttelse og zonerings. Den nordvestlige del af Nyborg området har kategorien drikkevandsområde og en zonerings her forudsætter derfor afgrænsning af indvindingsoplandene. Der foreligger et potentialebillede for filtre dybere end 20 m udarbejdet for Fyns Amt af GEUS som indgår i eksemplet. De største indvindinger i området er på ca. 3 mio. m³ pr. år (Nyborg vandværk), men der er flere mellemstore og mange små vandværker i området. I alt er der i modellen medtaget mellem 50 og 100 indvindinger.

I Ejstrupholm området udgøres det primære magasin af et dybtliggende miocænt kvartarsandslag nordøst for byen som Ejstrupholm vandværk indvinder fra. Syd for Ejstrupholm er der udpeget et område med særlige drikkevandsinteresser bestående af et relativt sammenhængende øvre kvartært og dybere miocænt magasin. Der er i området indsamlet en detaljeret synkronpejlerunde med henblik på nærmere vurdering af potentialeforhold. Der er kun få mindre vandværker i modelområdet men derudover en del erhvervsindvindinger (markvanding og dambrug).

I Sneum å oplandet udgøres det primære magasin i den østlige del af modelområdet af 'Ribe Formationen', som er et dybtliggende og stærkt vandførende miocænt sandlag. I den centrale og vestlige del er der en 'dyb kvartær dal i miocænet' som står i god kontakt til Ribe formationen. Der er i dag kun enkelte mindre vandværker i området som overvejende indvinder vand fra enten Ribe formationen eller kvartære sandlag i tilsvarende dybde (mere end 100 under terræn). Derudover foregår der i området udbredt vandindvinding fra øvre magasiner til markvanding. I eksemplet indgår simuleringer af en planlagt fremtidig større vandindvinding fra det ovenfor beskrevne magasinssystem på flere mio. m³/år.

7.1.2 Ensartet præsentation af resultater

For at gøre sammenligninger af de forskellige områder så overskuelig som muligt er det valgt at udarbejde en ensartet præsentation af resultaterne med en sammenstilling af i alt 6 figurer for hver case indeholdende:

- Grundvandspotentialer for det primære magasin (modelberegnet)
- Modelberegnet nedsivning til det øverste grundvands magasin (på figuren er i øverste venstre hjørne angivet den gennemsnitlige nedsivning for modelområdet som helhed; i øverste højre hjørne er nedsivningsfordelingen opgjort for 4 intervaller: < 0 - (dvs. opadrettet gradient), 0 - 50 mm/år, 50 - 200 mm/år og > 200 mm/år). For Fyn er anvendt dynamisk model, for Ejstrupholm og Sydvestjylland er benyttet en stationær model.
- Afgrænsning af infiltrations- og udstrømningsområder baseret på simple metoder f.eks. ud fra målte potentialebilleder, topografi mm. (i nederste venstre hjørne er fordelingen af grids vist; i øverste højre hjørne er vist en analyse af samtlige 'udstrømnings' grid, med beregning af hvordan disse fordeler sig på ovennævnte modelberegnete 4 nedsivningskategorier).
- Modelberegnet grundvandsdannelse til primær magasin (I øverste venstre hjørne er den gennemsnitlige grundvandsdannelse vist; i øverste højre hjørne er vist fordelingen af grundvandsdannelsen for 4 intervaller.
- Perkolations tid fra terræn til det primære magasin beregnet ved en simpel stempelstrømningsberegning (som beskrevet tidligere), dvs. på baggrund af nettonedbøren i modelområdet. Fordelingen er vist i øverste højre hjørne.
- Perkolations tid fra terræn til det primære magasin beregnet ved 'stempelstrømning', dvs. for hvert modeltag ud fra antaget porøsitet og lagtykkelse, og på baggrund af modelberegnet vertikal strømningshastighed. Til slut er samtlige perkolations tider akkumuleret for de enkelte lag fra terræn til toppen af det primære magasin. Der ses bort fra horisontal strømningskomponent. Fordelingen vist i øverste højre hjørne.

7.1.3 Lertykkelseskort, infiltrationsområder og indvindingsoplande

Akkumulerede lertykkelseskort (fra terræn til toppen af primært magasin) er vist for Sydøstfyn og Midtjylland områderne. For Sydvestjylland casen er det illustreret ved hjælp af modelberegninger, hvordan grundvandsdannelse og perkolations tid ændres, som følge af etablering af en ny større kildeplads i området. Ligeledes er afgrænsning af indvindingsoplandet vist for denne situation.

For Nyborg området og Ejstrupholm området der gennemført 3D partikelbanesimuleringer ved hjælp af MIKE SHE modellen. For Esbjerg området er beregningerne baseret på PATH3D. For Ejstrupholm er der endelig fortaget en opstilling af MODPATH (tilhørende Visual MODFLOW) med henblik på at sammenligne de forskellige modelkoder og beregningsprincipper. Der er herefter foretaget en simulering af infiltrationsområder til udvalgte vandindvindinger i de 3 områder, således at indvindingsoplande (IDFM) og infiltrationsområder er vurderet.

7.1.4 Partikelbanesimuleringer

Resultaterne er illustreret for Østfyn ved plot af infiltrationsområder for vandværker med filtersætning i 3 forskellige modellag (henholdsvis dybe og øvre magasiner), ligesom tilsvarende IDFM områder er afbildet baseret på MIKE SHE. I alt 16 større vandværker indgik i vurderingen for Østfyn.

For Ejstrupholm er der gennemført eksempler på partikelbanesimuleringer for Ejstrupholm vandværk, med henholdsvis en filtersætning som var gældende før atrazinforureningen blev konstateret omkring baneområdet i den sydlige del af byen, samt henholdsvis den filtersætning som efterfølgende blev anvendt, baseret på et dybere grundvandsmagasin (MODFLOW/MODPATH). Endelig er vist simuleringresultater med MODPATH for 7 mindre vandindvindinger.

Der er væsentlige forskelligheder på de to modelsystemer og modelopstillinger (MODFLOW/MIKE SHE), såvel med hensyn til opdelingen i modellag, håndtering af grundvandsdannelse som vandløbsrandbetingelser. Disse forskelle er således til dels et udtryk for begrænsninger i de forskellige systemer med hensyn til præcist at kunne håndtere det samme fysiske system. Begge modeller er søgt kalibreret ud fra pejlinger og afstrømningsmålinger i vandløb, men formålet med sammenligningen har ikke været at vurdere hvilken kode som er den bedste, men snarere at afprøve forskellige koder med henblik på at vurdere fordele og ulemper ved disse.

7.1.5 Diskussion af zoneringsprincipper

Diskussionen af zoneringsprincipper omfatter følgende emner

- arealdistribueret grundvandsdannelse
- grundvandets trykforhold; infiltrationsområder, intermediære zoner og udstrømningsområder til områder med særlige drikkevandsinteresser
- transporttid gennem dæklag, inert stof
- simpel stofomsætning (redox- og pH-forhold)
- stoftransport (densitetsstrømning og sorption/nedbrydning)
- lertykkelseskort (Nyborg og Midtjylland)
- afgrænsning af indvindingsoplande og infiltrationsområder
- konsekvenser af vandindvinding på grundvandsdannelse (Sydvestjylland)

7.2 Østfyn-området

7.2.1 Kort beskrivelse af området

Fyn-området består af yngre glaciale aflejringer med tunneldale. Der er lokale kvartære grundvandsmagasiner over regionale magasiner i to niveauer. Der er udbredte dæklag af moræneler, men der er mange steder vinduer hvor moræneleren enten er tynd, eller der er vinduer af sand. Den årlige nettonedbør er ca. 250 mm; minimumsvandføringen er omkring 50 mm.

Grundvandsmodellen er opbygget i 7 beregningslag på baggrund af en geologisk model bestående af i alt 9 geologiske lag. De øverste 3 lag i den geologiske model består af en umættet zone på knap 5 meter, et morænelerslag samt et øvre sekundært sandlag som primært forekommer i den sydøstligste del af modelområdet (sandlaget er typisk beliggende omkring kote 30-50 m). De 3 øverste geologiske lag er slået sammen til beregningslag 1 i modellen. Herunder følger beregningslag 2 (moræneler), lag 3 (regionalt sandmagasin), lag 4 (moræneler), lag 5 (dybtliggende sandmagasin), lag 6 (moræneler + lavpermeabelt mio-cænt ler) og lag 7 (vandførende del af prækvartæret/kalken). Modellens maskevidde er 500x500 meter.

7.2.2 Resultater for Østfyn

Grundvandspotentiale

Resultaterne for Østfyn området er vist i figur 7.1. Trykniveauet i det primære magasin varierer fra kote ca. 90 i den sydvestlige del af modelområdet og strømmer herfra mod nord og øst til kote 0 i kystområderne mod øst og nord. Det primære potentiale står ikke i direkte god kontakt med vandløbene, men topografi (og vandløbssystemet) er dog styrende for det regionale trykniveaubillede (figur 7.1a).

Modelberegnet nedsivning

Den modelberegnete nedsivning til det øverste grundvand (lag 1) udgør i området ca. 123 mm/år, altså kun omtrent halvdelen af nettonedbøren. Den resterende del afstrømmer via dræn eller overfladisk afstrømning direkte til vandløb eller hav. Det fremgår af fordelingen at 26 % af arealerne (633 grid) er udstrømningsområder uden nedsivning, 9 % (217 grid) har en nedsivning på 0-50 mm/år (typisk beliggende i overgangszonen mellem nedsivnings- og udstrømningsområderne), 34 % (831 grid) har en nedsivning mellem 50-200 mm/år og 31 % (766 grid) har en nedsivning over 200 mm/år (figur 7.1b).

Udstrømnings- og infiltrationsområder

På baggrund af et potentialebillede ud fra pejlinger for filtre i mindst 20 meters dybde fra GEUSs borearkiv sammenlignet med modeltopografien fratrukket 0.5 m (svarende til en typisk drændybde) er der foretaget afgrænsning af udstrømnings og infiltrationsområder. 88 % af området udgøres infiltrationsområder mens kun 12 % udgør udstrømningsområder. Den simple metode giver dermed et væsentligt mindre areal for udstrømningsområder i forhold til modellen (fig. 7.1b) som gav 26 %.

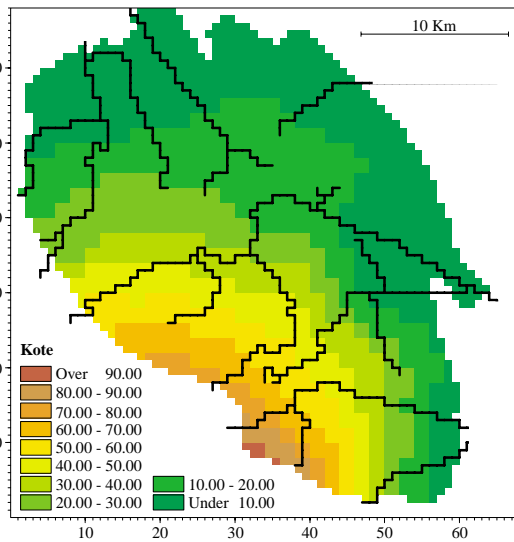
Analysen af fordelingen af grids som ved den simple metode er vurderet svarende til udstrømningsområde resulterede i at 52 % af udstrømningsgrids svarende til områder med opadrettet gradient jf. modellen, 16 % af udstrømningsgrids havde i modellen nedsivning mellem 0-50 mm/år, 17 % havde mellem 50-200 mm nedsivning pr. år og hele 15 % havde en nedsivning på over 200 mm pr. år.

Knap halvdelen af alle grid kortlagt ved den simple metode var altså 'falsk positive' svarende til at de udgør infiltrationsområder med større eller mindre nedsivning. Nogen af de grid hvor den simple metode går galt er i nærheden af de større vandværker beliggende tæt på vandløb. Årsagen til afvigelserne er formentlig en blanding af interpolationsfejl og et utilstrækkeligt datagrundlag (i form af pejlinger). En kortlægning af infiltrations- og udstrømningsområder kan formentlig kun ske rimeligt præcist såfremt der indsamles forholdsvis detaljerede synkronpejlinger i et stort antal boringer i både øvre og dybere magasiner (figur 7.1c).

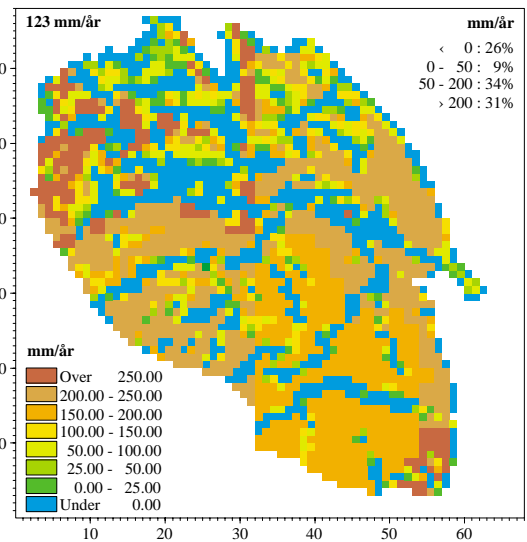
Modelberegnet grundvandsdannelse til primære magasin

I gennemsnit udgør grundvandsdannelsen til kalken 30 mm/år i Østfyn området. I modellen er kalkmagasinet repræsenteret med distribueret transmissivitet og såvel tykkelsen af lav-permeable dæklag som transmissiviteten har betydning for grundvandsdannelsen til kalken. 30 % af alle grid har opadrettet strømning mod øvre lag. Når antallet af grid som er udstrømningsområder er større end for lag 1 (som var 26 %) skyldes det dels at opsvinngen fra kalken mod øvre modellag og vandløb spredes ud over et større område, dels at der visse steder foregår en vandindvinding fra øvre lag fra mellemstore vandforsyninger hvor afsænkninger giver opadrettet gradient i kalken. For områder med grundvandsdannelse dominerer grid i intervallet 0-50 mm (49 % af samtlige grid), mens 20 % har nedsivning mellem 50-200 mm/år og kun 1 % har nedsivning over 200 mm/år (figur 7.1d).

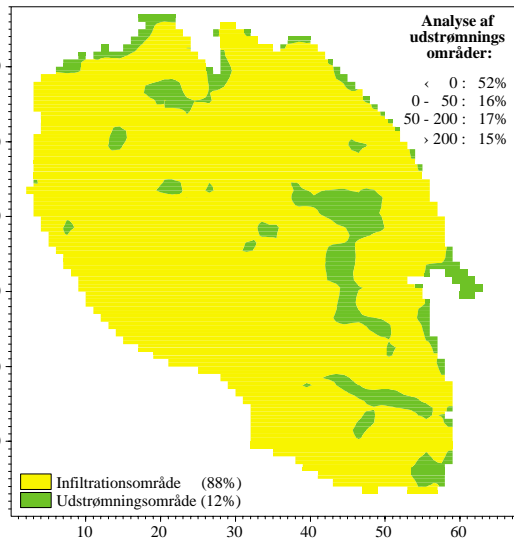
a) Grundvandspotentiale lag 7 og vandløb



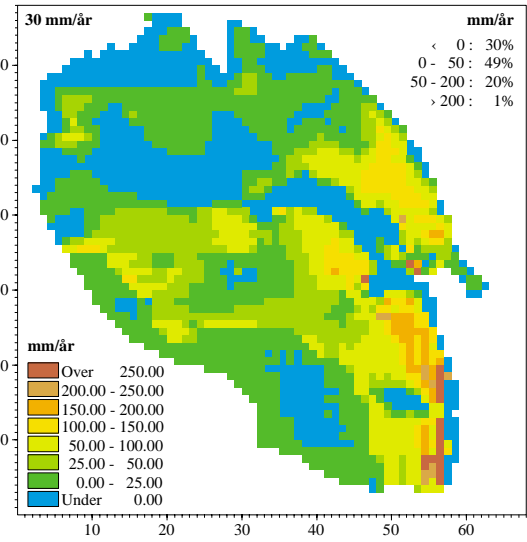
b) Nedsivning, lag 1



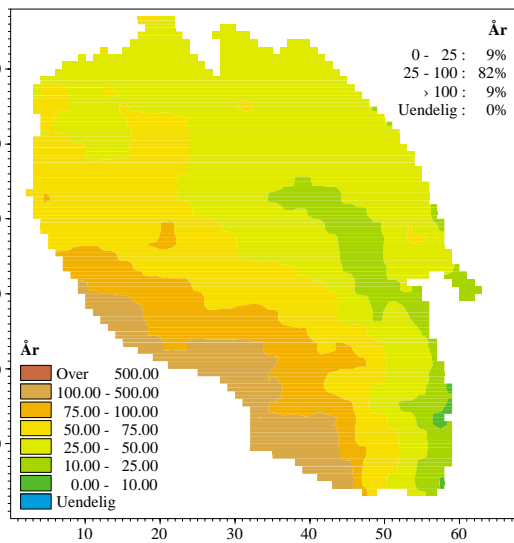
c) Infiltration / udstrømning



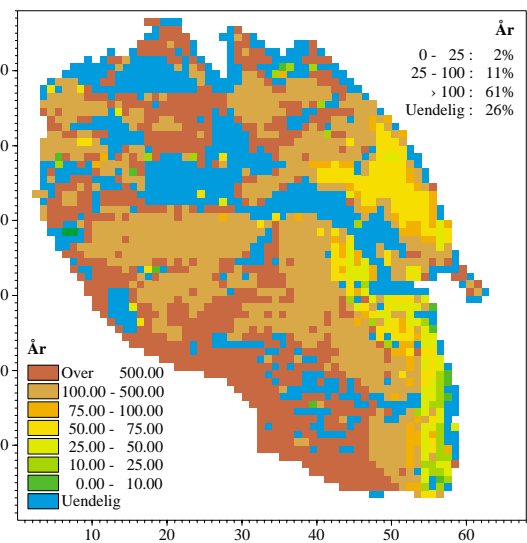
d) Grundvandsdannelse, lag 7



e) Perkolations tid til lag 7, stempelstrømningsberegning



f) Perkolations tid til lag 7, modelberegnet



Figur 7.1 Østfyn området

Perkolations tid beregnet ved stempelstrømning

De beregnede perkolations tider til kalken med stempelstrømningsmetoden (fig. 7.1e) ud fra antagelse om konstant nedsivning svarende til nettonedbøren giver perkolations tider mellem 0 år og ca. 150 år. Arealer med perkolations tid mellem 0-25 år svarer til 9 % af modelområdet, perkolations tider mellem 25-100 år svarer til 82 % af modelområdet og over 100 år, 9 % af modelområdet. En sammenstilling af 7.1c og 7.1e viser at i alt 36 % af modelområdet opfylder såvel et kriterium om at være infiltrationsområde som at have en perkolations tid som er mindre end 25 år (altså svarende til mest 'sårbare' kategori).

Modelberegnet perkolations tid

Perkolations tid baseret på vertikal strømning fra modellen varierede mellem 0 og til uendelig (områder med strømning til vandløb), fig. 7.1f. Kun 2 % af modelområdet havde perkolations tider i intervallet 0-25 år. 11 % tilhørte intervallet 25-100 år mens 61 % havde perkolations tider over 100 år. Især to typer områder skiller sig ud med perkolations tider under 100 år: 1) et til dels sammenhængende kystnært område nordvest, vest og syd for Nyborg, hvor kalkmagasinet ligger højt og kun har dæklag med mere begrænset tykkelse, samt 2) spredte grids i og omkring større vandindvindinger. Ved at sammenholde 7.1e og 7.1f er det opgjort at for 2139 grid (87 % af modelområdet) er transporttiden beregnet med simpel stempelstrømning mindre end den modelberegnet transporttid, dvs. på den sikre side.

Perkolations tid og grundvandsdannelse

Kombineres 7.1b nedsivning til lag 1 og 7.1f perkolations tid til kalken, så har 12 % af modelområdet (298 grid) en nedsivning til det øvre grundvand > 100 mm/år samtidig med at perkolations tiden er mindre end 100 år. At visse dele af modelområdet har perkolations tider som med den simple metode som overstiger den modelbaserede, kan kun skyldes at der foregår en horisontal strømning i de vandførende lag, som 'klinger ud' som det f.eks. er tilfældet med kvartære sandlag som tynder ud mod øst, hvilket resulterer i en nedadrettet strømning som lokalt er større end nettonedbøren mod kalken.

7.2.3 Diskussion af zoneringsprincipper for Østfyn

Arealdistribueret grundvandsdannelse

Område Østfyn har flere vandførende lag i forskellige niveauer, vinduer af sandlag i morænedækket med mere lokal udstrækning, kvartære grundvandsmagasiner som visse steder kun har lokal udbredelse og et kalkmagasin som har stor variation med hensyn til vandførende egenskaber. For et sådant område forudsætter en vurdering af grundvandsdannelsen til kalken en 3D-model såfremt zoneringsen ønskes optimeret ud fra hvor den væsentligste grundvandsstilførsel sker. Eksemplet for Nyborg området viser at kun ca. 20 % af området havde en grundvandsdannelse over 50 mm/år.

Grundvandets trykforhold

I ca. halvdelen af de afgrænsede udstrømningsområder viste modellen større eller mindre nedsivning. I et område som Østfyn vurderes konceptet for den simple metode derfor ikke anvendeligt ved zonerings, såfremt det alene baseres på eksisterende data.

Det vurderes at man som minimum må indsamle yderligere synkronpejlinger i et forholdsvis stort antal borer i både øvre og dybere magasiner. Udgiften til kortlægning vurderes til ca. 1000 kr. pr. km² (til rekognoscering af borer, pejlinger, kotebestemmelser, dataanalyser mm.). Ved en modellering vil sådanne data forbedre resultaterne men en afgrænsning kan godt baseres på eksisterende data.

Transporttid

Perkolations-tid baseret på stempelstrømning giver i 87 % af samtlige grid resultater på den sikre side. Den fastlagte variation inden for området er imidlertid ikke særligt realistisk i forhold til den modelberegne-de. Brugen af den simple stempelstrømningsmetode er derfor uegnet for dybe magasiner, hvor metoden giver usikre resultater såvel i forbindelse med 'vinduer' i lerlagene som omkring kildepladser, hvor der på grund af afsænkningen i det dybe lag introduceres forøgede vertikale perkolations-tider, afhængigt af afsænkningens størrelse i forhold til den naturlige gradient.

De beregnede perkolations-tider giver et billede af de overordnede variationer inden for et område. De tager dog ikke højde for variationer som måtte være inden for en lokal skala (f.eks. inden for et beregnings-grid på 500x500 m). Denne heterogenitet bevirker at der fra en mindre del af griddet foregår en transport som går væsentlig hurtigere end middelværdien, mens andre dele har en langsommere transport. Der vil dermed være en stor spredning på perkolationen, hvor den hurtigste transport typisk kan være en faktor 10 større end middelværdien. I områder med en beregnet perkolations-tid på f.eks. 100 år kan der derfor være mindre delområder hvor den faktiske perkolations-tid blot er omkring 10 år. Dette problem er imidlertid mest udtalt ved vurdering af perkolations-tider for de øvre magasiner, hvor spræktransport og makroporer giver særlige problemer.

Stofomsætning og stoftransport

Den sydøstlige del af modelområdet, dvs. kystzonen mod Storebælt syd for Nyborg, er problemområde med hensyn til nitrat (GEUS, 1995). Dette stemmer relativt godt i forhold til de modelberegne-de perkolations-tider, idet dette område er vurderet at have de korteste perkolations-tider (typisk mindre end 25 år). Der er desuden en tendens til at fund af pesticider eller påvisning af pesticider er positivt korreleret til den modelberegne-de perkolations-tid (jf. figur 10.3 i GEUS, 1995).

7.3 Ejstrupholm-området

7.3.1 Kort beskrivelse af området

Ejstrupholm-området er beliggende på hovedopholds-linien og domineret af et bakkeø/hedeslettelandskab. Der er lokalt dæklag af moræneler over sandmagasinerne. De primære grundvandsmagasiner består af miocænt sand, der forekommer lokale kvartære magasiner. Den årlige nettonedbør er omkring 500 mm, og minimumsvandføringen er omkring 125 mm. Hovedparten af vandindvindingen finder sted i prækvartære magasiner. Der er mindre indvinding til bl.a. markvanding fra de kvartære magasiner.

Grundvandsmodellen er bygget op omkring 16 geologiske lag og 7 beregningslag. Øverst 3 lag af smeltevandssand og moræneler. Derunder vekslende lag af glimmerler, glimmersand og kvartssand. I modellen de øverste 4 lag af moræneler, smeltevands- og glimmersand slået sammen til et beregningslag. Herunder følger 3 lag af glimmerler og 3 beregningslag af vekslende kvarts- og glimmersand. Der er i alt 12 vandindvindinger med i modellen, heraf 4 i lag 7 (mindre indvindinger på 200-600.000 m³ pr. år). Modellens maskevidde er 250x250 meter.

7.3.2 Resultater for Ejstrupholm

Resultaterne for Ejstrupholm området er vist i figur 7.2. Trykniveauet i det primære magasin varierer fra kote ca. 90 i den østlige del af modelområdet til kote 50 i den vestlige del. Det primære potentiale står ikke i direkte god kontakt med vandløbene, men topografi (og

vandløbssystemet) er dog styrende for det regionale trykniveau billede med stor indflydelse fra specielt Skjern å, det sydligste vandløb i området (figur 7.2a).

Modelberegnet nedsivning

Den modelberegnete nedsivning til det øverste grundvand (lag 1) udgør i området ca. 161 mm/år altså 64 % af nettonedbøren på 250 mm/år. Den resterende del afstrømmer gennem de øvre jordlag direkte til vandløb. Det fremgår af fordelingen at 33 % af arealerne er udstrømningsområder uden nedsivning, 3 % har en nedsivning på 0-50 mm/år, 7 % har en nedsivning mellem 50-200 mm/år og 57 % har en nedsivning over 200 mm/år (fig.7.2b).

Udstrømnings- og infiltrationsområder

80 % af området udgøres af infiltrationsområde, 20 % er udstrømningsområder., figur 7.2c. En nærmere analyse af udstrømningsområderne (fig. 7.c) viser at i 78 % af disse har opsvining sammenlignet med modelberegningerne (fig. 7.2b), 3 % har nedsivning mellem 0-50 mm/år, 7 % har nedsivning mellem 50-200 mm/år og 12 % har nedsivning over 200 mm/år. Udstrømningsområderne følger Skjern å i syd og Holtum å i den centrale del af modelområdet.

Grundvandsdannelse

I gennemsnit udgør grundvandsdannelsen til det dybe miocæne magasin 36 mm/år. 33 % af alle grid har opadrettet strømning mod øvre lag. (figur 7.2d). 37 % har grundvandsdannelse mellem 0-50 mm/år, 28 % mellem 50-200 mm/år og 2 % over 200 mm/år. Den største grundvandsdannelse til det dybe magasin sker i den sydøstlige og sydligste del af modelområdet hvor den mange steder er over 100 mm/år.

Der er ligeledes stor grundvandsdannelse (mere end 50 mm/år) til dybe magasin mellem Holtum å og Skjern å, lige syd for Ejstrupholm (som ligger omtrent midt i modelområdet), samt i et bælt i den nordlige del af modelområdet.

Perkolationstid beregnet ved stempelstrømning

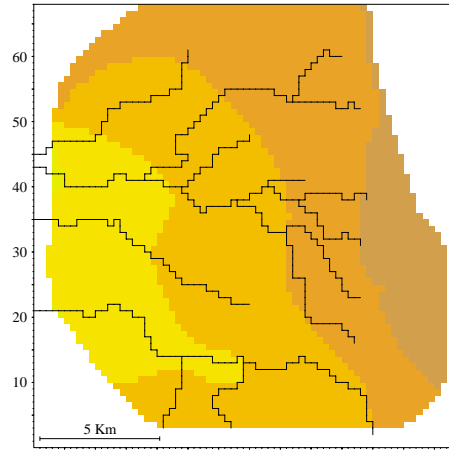
De beregnede perkolationstider til det dybe miocæne magasin med stempelstrømningsmetoden (fig. 7.2e) ud fra antagelse om konstant nedsivning svarende til nettonedbøren giver perkolationstider fra ca. 25 år til over 100 år. Arealer med perkolationstid mellem 25-100 år svarer til 91 % af modelområdet og over 100 år, 9 % af modelområdet. En sammenstilling af 7.2c og 7.2e viser at i alt 31 % af modelområdet opfylder såvel et kriterium om at være infiltrationsområde som at have en perkolationstid som er mindre end 25 år (altså svarende til mest 'sårbare' kategori).

Modelberegnet perkolationstid

Perkolationstid baseret på vertikal strømning fra modellen varierede mellem 0 og til uendelig (områder med strømning til vandløb), fig. 7.2f. 43 % af modelområdet har perkolationstid uendelig. Kun 0,2 % af modelområdet havde perkolationstider i intervallet 0-25 år. 1 % tilhørte intervallet 25-100 år mens 56 % havde perkolationstider over 100 år. Den 'mest sårbare' del af modelområdet i relation til perkolationstider udgøres af de områder som også havde størst grundvandsdannelse til det dybe magasin, dvs. det sydøstlige/ sydligste område samt området syd for Ejstrupholm (mellem Skjern å og Holtum å), hvorimod bæltet med stor grundvandsdannelse gennem den nordlige del af modelområdet har perkolationstider over 500 år.

På grund af relativ lille vandindvinding er der ingen af de 4 vandindvindinger fra det dybe magasin som træder frem på den modelberegnete perkolationstid. Dette svarer godt til konkrete vurderinger i området, idet det vurderes at grundvandsdannelsen til bl.a. Ejstrupholm vandværk centralt i modelområdet på grund af opadrettet gradient dannes i stor afstand fra vandværket.

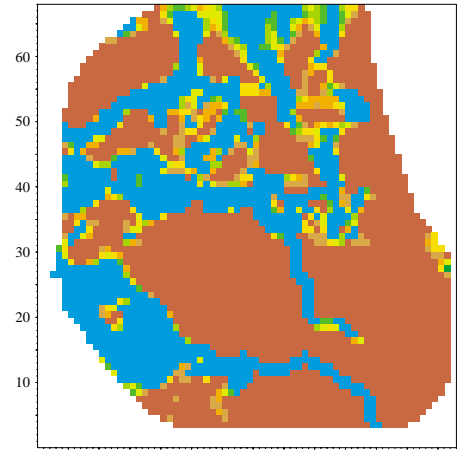
a) Grundvandspotentiale lag 7 og vandløb



Kote	
Over 90.00	40.00 - 50.00
80.00 - 90.00	30.00 - 40.00
70.00 - 80.00	20.00 - 30.00
60.00 - 70.00	10.00 - 20.00
50.00 - 60.00	Under 10.00

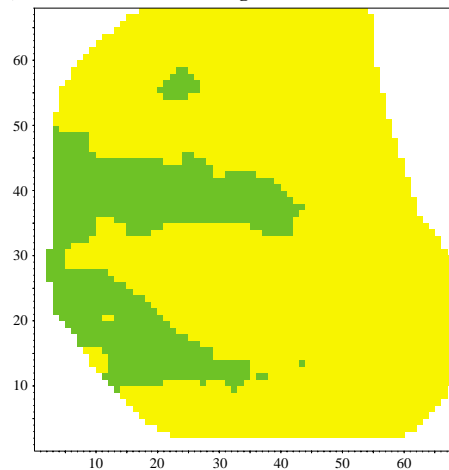
b) Nedsivning lag 1

161 mm/år



mm/år		mm/år
Over 250.00	50.00 - 100.00	< 0 : 33%
200.00 - 250.00	25.00 - 50.00	0 - 50 : 3%
150.00 - 200.00	0.00 - 25.00	50 - 200 : 7%
100.00 - 150.00	Under 0.00	> 200 : 57%

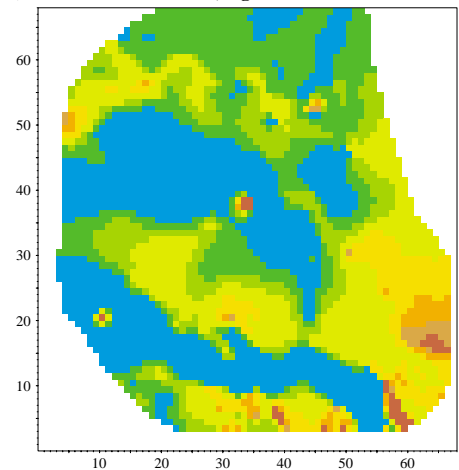
c) Infiltration / udstrømning



Infiltrationsområde (80%)
Udstrømningsområde (20%)

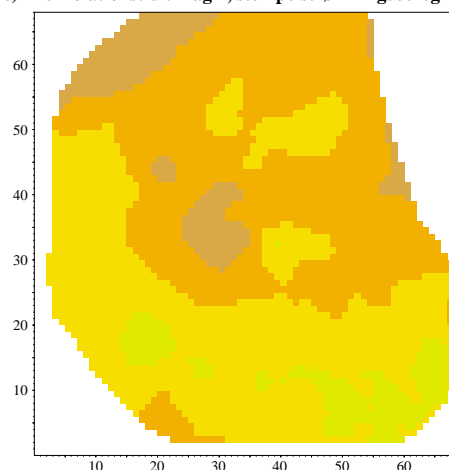
d) Grundvandsdannelse, lag 7

36 mm/år



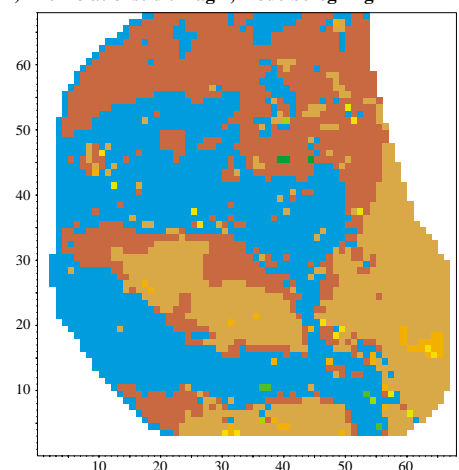
mm/år		mm/år
Over 250.00	50.00 - 100.00	< 0 : 33%
200.00 - 250.00	25.00 - 50.00	0 - 50 : 37%
150.00 - 200.00	0.00 - 25.00	50 - 200 : 28%
100.00 - 150.00	Under 0.00	> 200 : 2%

e) Perkolations tid til lag 7, stempelstrømningsberegning



År		År
Over 500.00	25.00 - 50.00	0 - 25 : 0%
100.00 - 500.00	10.00 - 25.00	25 - 100 : 91%
75.00 - 100.00	0.00 - 10.00	> 100 : 9%
50.00 - 75.00	Uendelig	Uendelig : 0%

f) Perkolations tid til lag 7, modelberegning



År		År
Over 500.00	25.00 - 50.00	0 - 25 : 0.2%
100.00 - 500.00	10.00 - 25.00	25 - 100 : 1%
75.00 - 100.00	0.00 - 10.00	> 100 : 56%
50.00 - 75.00	Uendelig	Uendelig : 43%

Figur 7.2 Ejstrupholm området

Perkolationstid og grundvandsdannelse

Kombineres 7.2b nedsivning til lag 1 og 7.2f perkolationstid til dybt miocænt magasin har 0,8 % af modelområdet (31 grid) nedsivning til det øvre grundvand større end 100 mm/år samtidig med at perkolationstiden er mindre end 100 år.

I alt ca. 86 % af samtlige grids har en perkolationstid ved den simple stempelstrømningsmetode som er mindre end den modelberegne. Kun for 14 % af modelområdet giver den simple metode en overvurdering af transporttiden. Perkolationstidsberegningen ved stempelstrømningsmetoden er generelt på den sikre side, men i lighed med Østfyn er den simple metode ikke velegnet til at karakterisere dybe magasiner, idet det billede denne metode tegner er afgørende forskelligt fra den modelbaserede.

7.3.3 Diskussion af zoneringsprincipper for Ejstrupholm

Arealdistribueret grundvandsdannelse

Grundvandsdannelsen til det dybe miocæne magasin sker overvejende i en begrænset del af modelområdet (sydligste, sydøstlige, et område mellem Skjern å og Holtum å syd for Ejstrupholm samt i et bælt gennem nordlige del). 30 % af modelområdet havde grundvandsdannelse > 50 mm/år. Afgrænsningen af grundvandsdannende områder er meget kompleks og kan ikke foretages uden en 3D model.

Grundvandets trykforhold

Figur 7.2c viser infiltrations- og udstrømningsområder afgrænset på grundlag af topografi og potentialekort. Afgrænsningen viser god overensstemmelse med modelresultater, idet 78% af udstrømningsområdet også har opsvining jf. model.

Transporttid

Den simple metode giver et noget misvisende billede af perkolationstiden til det dybe magasin. Perkolationstidsvurdering forudsætter i lighed med Østfyn brug af en 3D grundvandsmodel.

Stofomsætning og stoftransport

Det dybe miocæne magasin ved Ejstrupholm indeholder blødt og neutralt vand med pH omkring 7 med et lille indhold af bikarbonat, forhøjet indhold af jern og et ringe indhold af nitrat, sulfat og fosfor. Grundvandet i det dybe magasin er ikke overfladepåvirket, men grundvandskemi er formentlig svagt påvirket af forekomsten af kalkminerale. De øvre magasiner i området syd for Ejstrupholm (mellem Holtum å og Skjern å) er karakteriseret ved iltet og nitratholdigt grundvand med begyndende forsurening, og grundvandet i det øvre magasin kan generelt betegnes som værende stærkt overfladepåvirket og stedvis uegnet som drikkevand. Det dybe grundvand i dette område har et lavt nitratindhold, dog med et lidt højt sulfatindhold som kan skyldes en nitratbelastning der omsættes f.eks. ved pyritoxidation (Henriksen et.al., 1995a).

7.4 Sneum å området

7.4.1 Kort beskrivelse af området

Geologien i modelområdet er opbygget af miocæne og kvartære aflejringer (Henriksen et. al., 1995b). I den centrale del af modelområdet udgør de kvartære aflejringer en op til 200 m dyb dal. Mod vest har dalsystemet 'afløb mod havet'. De lerrige enheder af kvartæret bliver mere hyppige og mere sammenhængende imod den sydlige del af området.

Miocænet er opdelt i marine og limniske aflejringer. Gram, Hodde og Arnum Formationerne er dannet i havet, og Odderup og Ribe Formationerne er overvejende dannet i ferskvand og brakvand.

Modellen er opbygget af i alt 11 lag. Lag 1-3 har varierende tykkelse afhængigt af topografien (lag 1: > 40 m, lag 2: 20-40 m og lag 3: 0-20 m). Lag 8 udgør mod øst Ribe Formationen og i den centrale del det lag som har interesse i forbindelse med indvinding fra kvartæret. Der er gennemført vurderinger for lag 8. Dels er forholdene belyst ud fra eksisterende vandindvinding, dels er foretaget udvalgte beregninger med en ny kildeplads med en indvinding på 6 mio. m³/år beliggende midt i modelområdet omkring grid (42,33). Modellens maskevidde er 500x500 m.

7.4.2 Resultater for Sneum å området

Resultaterne for Sneum å oplandet er vist i figur 7.3. Trykniveauet i det primære magasin varierer fra kote ca. 60 i den østlige del af modelområdet til kote 0 i kystområdet. Det primære potentiale står i relativ god kontakt til vandløbene omkring Kongeåen (i syd) og Sneum å (i vest, figur 7.3a).

Modelberegnet nedsivning

Den modelberegnete nedsivning til det øvre miocæne lag (lag 4) udgør i området 103 mm/år, altså kun 43 % af grundvandsdannelsen (som svarer til ca. 240 mm/år). Den resterende del afstrømmer gennem de øvre kvartære jordlag til vandløb. Det fremgår af fig. 7.3b at fordelingen er 31 % udstrømningsområder, 15 % har nedsivning på 0-50 mm/år og 24 % har nedsivning over 200 mm/år. Der er dermed tale om en meget distribueret nedsivningsfordeling til de miocæne magasiner.

Udstrømnings- og infiltrationsområder

85 % af området udgøres af infiltrationsområde, 15 % er udstrømningsområder, fig. 7.3c. En nærmere analyse af udstrømningsområderne viser at 56 % af disse har nedsivning mindre end 0 mm/år (fig. 7.3b), 16 % har nedsivning mellem 0 og 50 mm/år, 26 % har nedsivning mellem 50 og 200 mm/år og 2 % har nedsivning over 200 mm/år.

Grundvandsdannelse

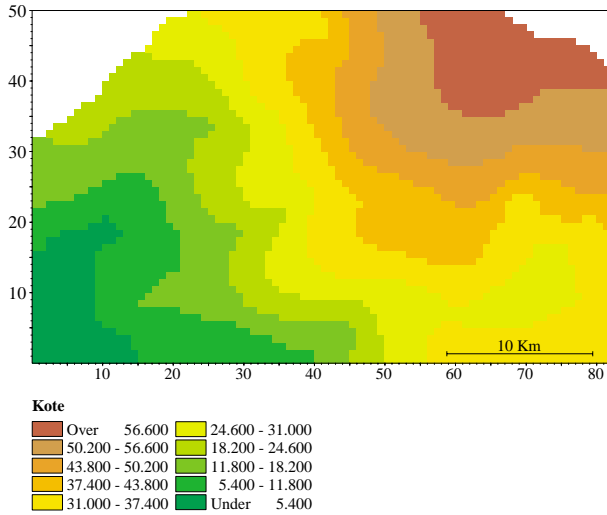
I gennemsnit udgør grundvandsdannelsen til det dybe miocæne magasin 48 mm/år. 37 % af alle grid svarer til opadrettet strømning mod øvre lag (fig. 7.3d). 31 % har grundvandsdannelse mellem 0 og 50 mm/år, 30 % mellem 50 og 200 mm/år og 2 % over 200 mm/år.

Det fremgår at langt den største del af grundvandsdannelsen til det dybe magasin sker fra den østlige del af modelområdet. Kun nogle mindre områder har lokal grundvandsdannelse til lag 8.

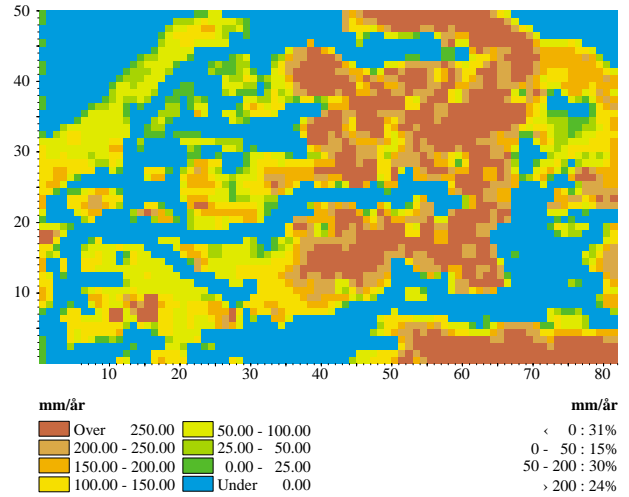
Perkolationstider beregnet ved simpel stempelstrømning

De beregnede perkolationstider til det dybe miocæne magasin med stempelstrømningsmetoden (fig. 7.3e) ud fra antagelse om konstant nedsivning svarende til nettonedbøren giver perkolationstider over 100 år. I den vestlige del overvejende 100-150 år og i nordøst 250-500 år.

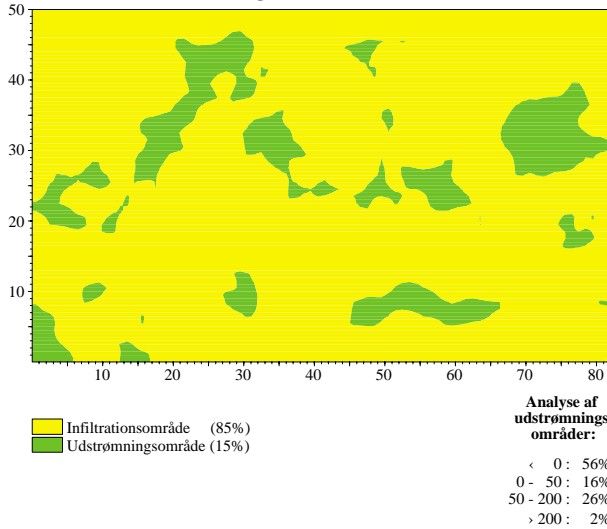
a) Grundvandspotentiale lag 4 og vandløb



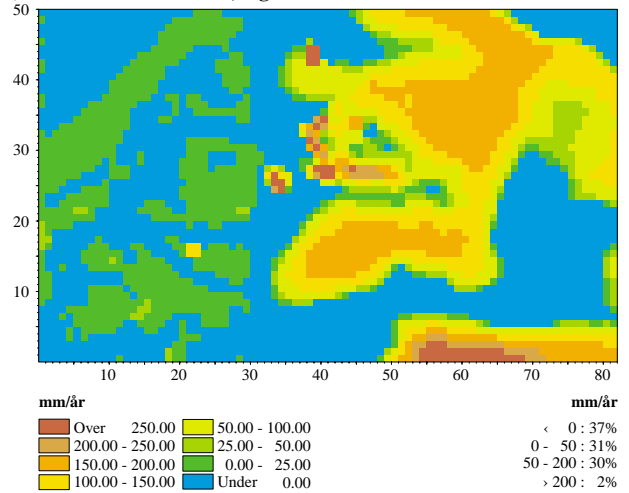
b) Nedsivning, lag 4



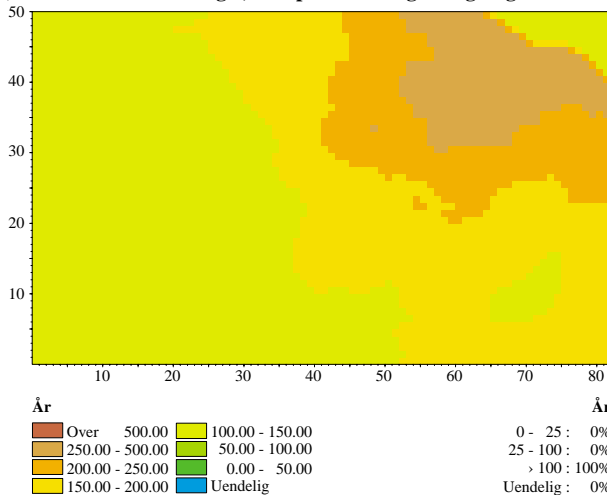
c) Infiltration / udstrømning



d) Grundvandsdannelse, lag 8



e) Perkolationstid til lag 8, stempelstrømningsberegning



f) Perkolationstid til lag 8, modelberegnet

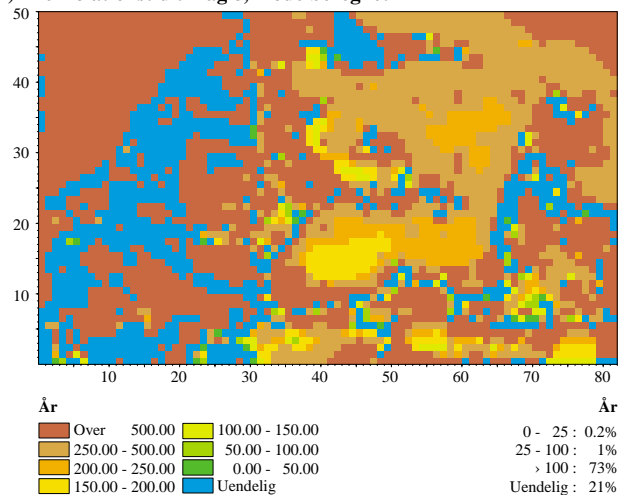


Fig. 7.3 Sneum å oplandet

Modelberegnet perkolationstid

Perkolationstider baseret på model varierede mellem 0 og uendelig, fig. 7.3f. 21 % af modelområdet har uendelig perkolationstid (strømning mod vandløb). Kun 0,2 % af modelområdet havde perkolationstider i intervallet 0-25 år. 1 % tilhørte intervallet 25-100 år mens 78 % havde perkolationstider over 100 år. Disse beregninger er dermed i overensstemmelse med aldersdateringer med kulstof 14 i området som for det dybe magasin gav en alder fra omkring 200 år op til ca. 4000 år.

Kombination

Kombineres 7.3b nedsivning til lag 4 og 7.3f perkolationstid til dybt miocænt magasin så har 0,2 % af modelområdet såvel en nedsivning til det øvre grundvand større end 100 mm/år samtidig med at perkolationstiden er mindre end 100 år.

I alt ca. 90 % af samtlige grids har en perkolationstid ved den simple stempelstrømningsmetode som er mindre end den modelberegne. Kun for 10 % af modelområdet giver den simple metode en overvurdering af transporttiden. Perkolationstiden ved stempelstrømningsmetoden er generelt på den sikre side, men i lighed med Østfyn og Midtjylland er den simple metode ikke velegnet til at karakterisere dybe magasiner.

7.4.3 Diskussion af resultater for Sneum å

Arealdistribueret grundvandsdannelse

Grundvandsdannelsen kan ikke vurderes ved simple metoder til dybt magasin. En vurdering af grundvandsdannelsen til Ribe Formationen eller til det dybe kvartære magasin 80-100 m u.t. kan ikke gennemføres ved simple metoder. Såvel vurdering af størrelse (som i eksemplet for Sneum å) udgjorde 48 mm/år) som fordeling forudsætter en 3D model.

Grundvandets trykforhold

Afgrænsningen af områder med opadrettet trykniveau i forhold til terræn (minus 1 m) jf. fig. 7.3c er relativ forskellig fra modelberegning af opsving fra lag 4 (fig. 7.3b).

Transporttid

Simpel stempelstrømning giver upålideligt resultat i Sneum å området. Der er ikke nogen sammenhæng mellem simpel stempelstrømningsberegning og modelbaseret beregning af perkolationstid for det dybe magasin. Simple metoder kan ikke anvendes til vurdering af perkolationstiden for dybe magasiner.

Stofomsætning og stoftransport

Vandtypen i det dybe magasin i kvartæret kan karakteriseres ved neutralt, reduceret, middelhårdt, ikke aggressivt til svagt aggressivt og med let forhøjet jern, mangan og ammonium. Det kan ikke præcis forudsiges i hvilken dybde lagene træffes på grund af den tilsyneladende komplekse reservoirsituation.

I Ribe Formationen er vandet svagt surt, reduceret, middelhårdt og aggressivt med let forhøjet jern, mangan og ammonium. I området findes visse steder brunt vand (bl.a. i Odderup sandet).

En vurdering af stofomsætning og stoftransport i området er derfor vanskelig på grund af betydelige variationer inden for kort afstand.

7.5 Sammenstilling af resultater fra de 3 områder

I tabel 7.1 er resultater fra de 3 områder sammenstillet.

Tabel 7.1 Resultater af afprøvning af hydrauliske zoneringsprincipper i 3 testområder.

Resultat type	Østfyn området	Midtjylland området	Sydvestjylland området
Modelbaseret grundvandspotentialer, a)	0 - 90 m	40 - 90 m	0 - 60 m
Modelbaseret nedsivning, sekundære magasiner, b)	gennemsnit: 123 mm/år < 0 mm/år: 26 % 0-50 mm/år: 9 % 50-200 mm/år: 34 % > 200 mm/år: 31 %	gennemsnit: 161 mm/år < 0 mm/år: 33 % 0-50 mm/år: 3 % 50-200 mm/år: 7 % > 200 mm/år: 57 %	gennemsnit: 103 mm/år, ¹⁾ < 0 mm/år: 31 % 0-50 mm/år: 15 % 50-200 mm/år: 30 % > 200 mm/år: 24 %
Infiltration/udstrømning, ved simpel metode c)	infiltrationsområde: 88 % udstrømningsområde: 12 % analyse af u. område sammenholdt med nedsivning til sek. magasiner: u. omr. og < 0 mm/år: 52 % u. omr. og 0-50 mm/år: 16 % u. omr. og 50-200 mm/år: 17 % u. omr. og > 200 mm/år: 15 %	infiltrationsområde: 80 % udstrømningsområde: 20 %	infiltrationsområde: 85 % udstrømningsområde: 15 % analyse af u. område sammenholdt med nedsivning til sek. magasiner: u. omr. og < 0 mm/år: 56 % u. omr. og 0-50 mm/år: 16 % u. omr. og 50-200 mm/år: 26 % u. omr. og > 200 mm/år: 2 %
Modelbaseret grundvandsdannelse, primære magasin, d)	gennemsnit: 30 mm/år < 0 mm/år: 30 % 0-50 mm/år: 49 % 50-200 mm/år: 20 % > 200 mm/år: 1 %	gennemsnit: 36 mm/år < 0 mm/år: 33 % 0-50 mm/år: 37 % 50-200 mm/år: 28 % > 200 mm/år: 2 %	gennemsnit: 48 mm/år < 0 mm/år: 37 % 0-50 mm/år: 31 % 50-200 mm/år: 30 % > 200 mm/år: 2 %
Perkolationstid til primært magasin ved simpel stempelstrømning, e)	0-25 år: 9 % 25-100 år: 82 % > 100 år: 9 % uendelig: 0 %	0-25 år: 0 % 25-100 år: 91 % > 100 år: 9 % uendelig: 0 %	0-25 år: 0 % 25-100 år: 0 % > 100 år: 100 % uendelig: 0 %
Modelbaseret perkolationstid til primært magasin, f)	0-25 år: 2 % 25-100 år: 11 % > 100 år: 61 % uendelig: 26 %	0-25 år: 0,2 % 25-100 år: 1 % > 100 år: 56 % uendelig: 43 %	0-25 år: 0,2 % 25-100 år: 1 % > 100 år: 73 % uendelig: 21 %

1) Den beregnede nedsivning repræsenterer lag 4 i modellen og dermed ikke nedsivningen til det øverste lag i modellen som var ca. 240 mm/år

7.6 Lertykkelseskort

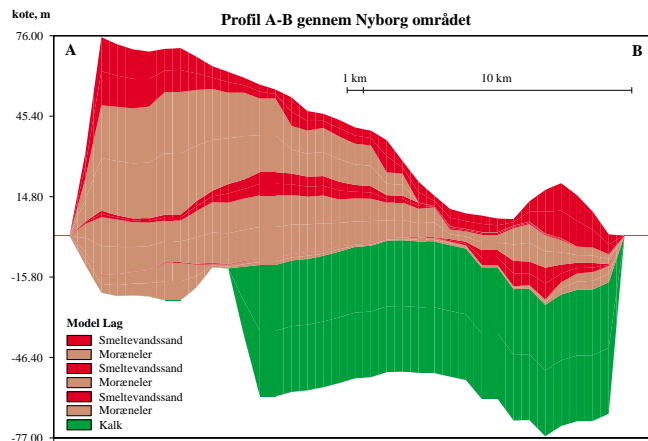
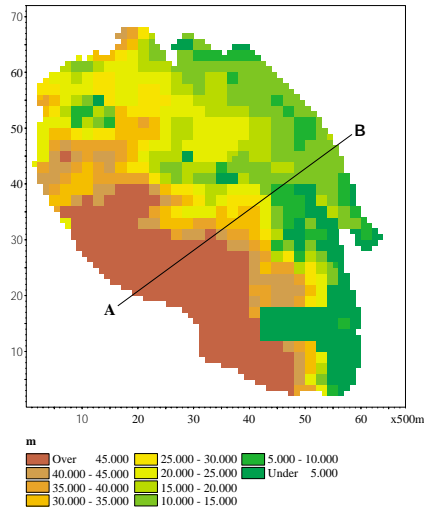
Lertykkelsen for Nyborg området er over 45 meter i den sydøstlige del af området og falder mod nordvest til under 5-10 meter i kystzonen og i lokale områder i den nordlige og centrale del af området (figur 7.4). Sammenligner man grundvandsdannelsen til lag 7 (fig. 7.1.d) og lertykkelseskort for Nyborg området fremgår det at der i området med mere end 45 meter moræneler lokalt forekommer grundvandsdannelser på 50-100 mm/år, hvilket formentlig skyldes at lertykkelseskortet ikke beskriver den rumlige sammenhæng mellem begrænsede vandførende lag i dette område. I en betydelig del af de områder hvor lertykkelsen er ringe har i øvrigt opadrettet strømning fra det primære magasin mod vandløb og er således (bortset fra lokale områder lige omkring indvindingsboringer med nedadrettet gradient) generelt godt beskyttede.

Lertykkelsen for Ejstrupholm området er lokalt op til 45 meter tykke men generelt af begrænset tykkelse (mindre end 15 meter) i store dele af området (figur 7.4). Sammenligner man grundvandsdannelsen til det primære magasin (fig. 7.2.d) ses det at der generelt er meget ringe sammenhæng mellem lertykkelser og grundvandsdannelser formentlig på grund af de komplekse geologiske forhold med vekslende vandførende lag og lerlag med varierende tykkelse.

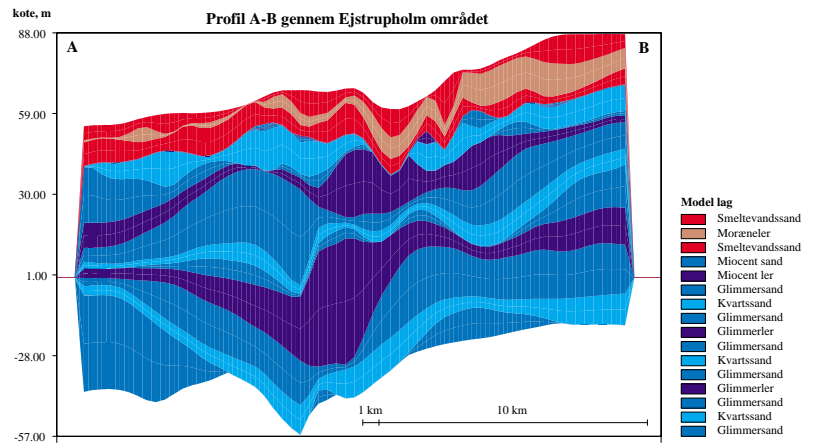
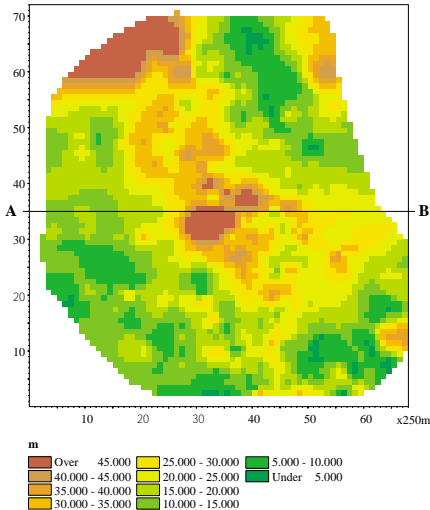
Akkumulerede lertykkelseskort vurderes ikke anvendelige til zonerings i områder med hydrogeologiske forhold som på Østfyn og i Midtjylland. Dels er en stor del af områder med tynde lerlag beliggende hvor der er opadrettet gradient mod f.eks. vandløb dels er der ingen eller kun ringe sammenhæng mellem akkumulerede lertykkelser og grundvandsdannelser i infiltrationsområder. Det kan dog ikke udelukkes at lertykkelseskort (med behørig vurdering

af hydrauliske forhold som følge af lodrette sprækker og sandvinduer) kan være relevante ved zoner af øvre magasiner eller ved andre hydrogeologiske forhold end gældende på Østfyn og i Midtjylland.

Akkumuleret tykkelse af ler og over det primære magasin lag 7



Akkumuleret tykkelse af ler og over det primære magasin



Figur 7.4 Lertykkelseskort og tværprofiler for Østfyn og Midtjylland

7.7 Afgrænsning af infiltrationsområder og indvindingsoplade til vandværker

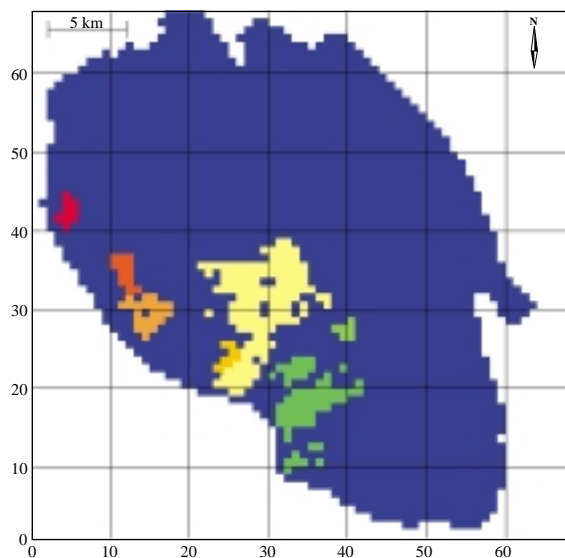
7.7.1 Partikelbanesimuleringer for Østfyn området

I figur 7.5 er vist resultatet af en simulering af infiltrationsområder for udvalgte boringer filtersat i henholdsvis lag 3, 5 og 7. På figuren er IDFM oplandet (indvindingsoplandet i det filtersatte magasin) ligeledes afbildet.

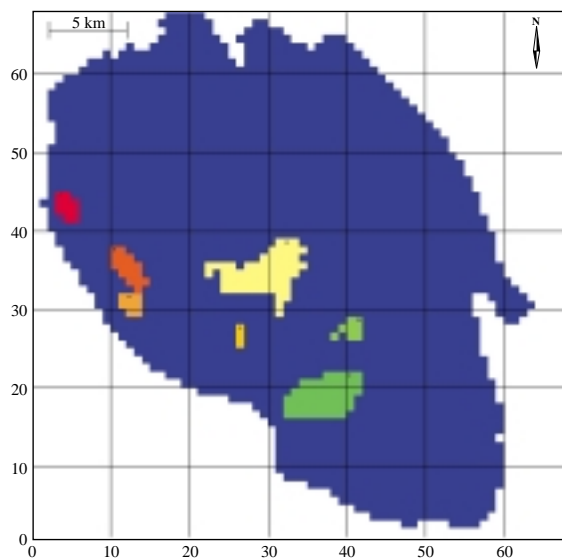
De to øverste afbildninger på figur 7.5 viser de simulerede infiltrationsområder og indvindingsoplade (IDFM) for 6 vandindvindinger fra lag 3, som er det mellemste smeltevandsmagasin, jf. figur 7.4.

Infiltrationsområde

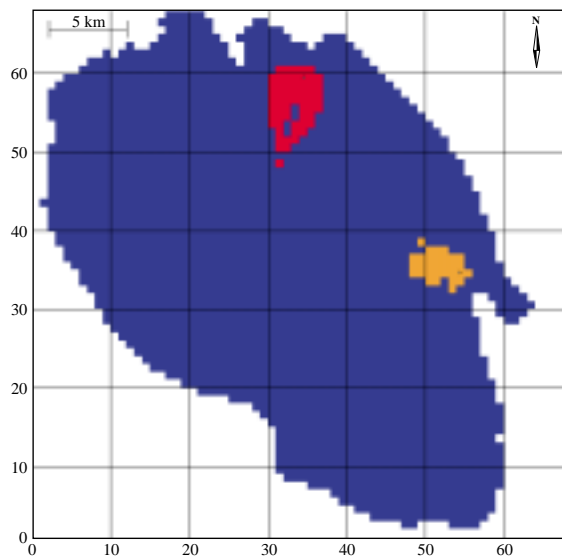
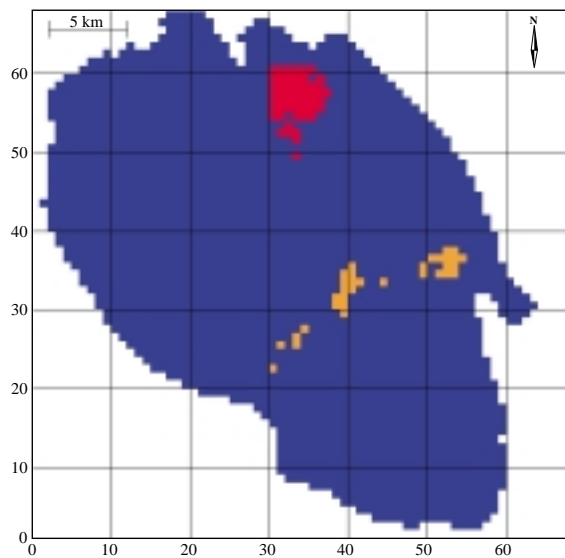
Lag 3
(sand)



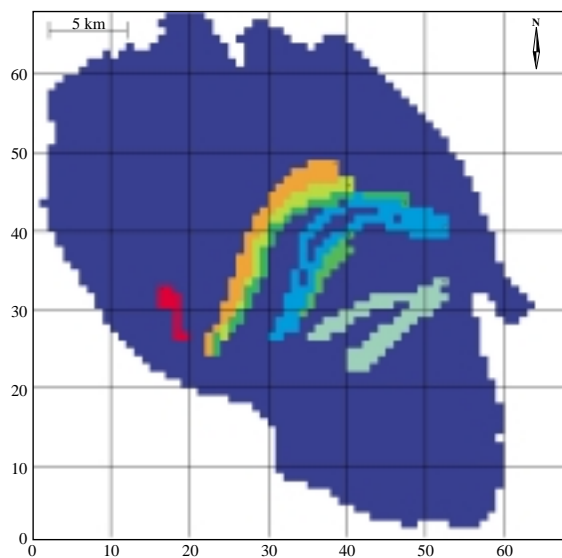
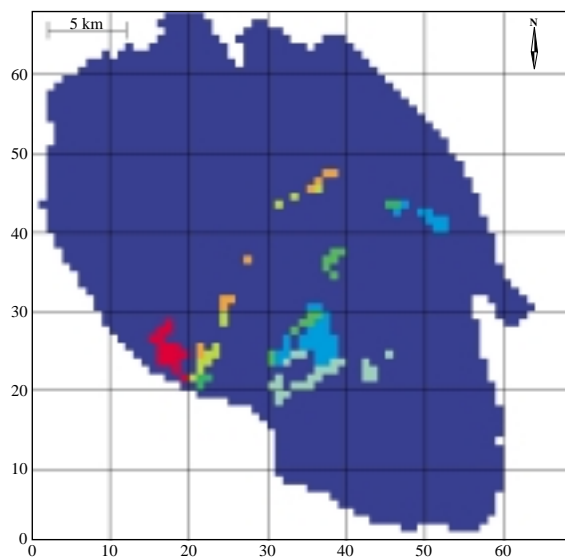
Indvindingsopland



Lag 5
(sand)



Lag 7
(kalk)



Figur 7.5 Simulerede infiltrationsområder og indvindingsoplunde (IDFM) for 16 vandværker på Østfyn (baseret på 3D partikelbanesimuleringer med MIKE SHE)

I de to mellemste afbildninger er vist infiltrationsområder og IDFM oplunde for 2 vandværker med indvinding fra lag 5, svarende til det dybeste smeltevandsmagasin (figur 7.4). Bemærk at vandværket ved Nyborg har et langstrakt infiltrationsområdet op mod grundvandskællet i sydvest.

På nederste afbildning er vist infiltrationsområder og IDFM oplunde for 7 vandværker med indvinding fra kalken. Der er for disse dybe borerer meget stor forskel på udstrækningen af IDFM oplundene og de tilhørende infiltrationsområder.

De i alt 16 vandværker har et relativt sammenhængende infiltrationsområde som er lokaliseret til den sydvestlige del af modelområdet. Kun enkelte infiltrationsområder er placeret uden for dette område, primært i nærområdet til vandværkerne, bl.a. et område omkring et vandværk i lag 5 i den nordlige del af modelområdet. En sammenligning med lertykkelser jf. figur 7.4 viser således at en meget stor del af infiltrationsområderne for Østfyn er placeret i områder med relativt store lertykkelser (visse steder over ca. 30 m). Grundvandsdannelsen til kalken (jf. figur 5.1) var meget begrænset i dette område (0-50 mm). Grundvandsdannelsen til det mellemste smeltevandsmagasin er i området mellem 0 og 100 mm. Grundvandsdannelsen til det øverste magasin er dog typisk 100-200 mm i dette område.

I et område som Østfyn med flerlagsmagasiner, giver analysen af grundvandsdannelse og transporttider gennem dæklag som vist i figur 7.1 ikke et godt billede af strømningsforholdene, idet den horisontale strømning i de vandførende lag, har stor betydning for en nærmere afgrænsning af infiltrationsområder til såvel magasiner som enkelte vandværker.

Hvis der ikke forelå en model ville man typisk antage at grundvandsdannelsen til f.eks. kalken overalt udgør ca. 30 mm/år, svarende til gennemsnittet for modelområdet. Ved afgrænsning af indvindingsoplunde vil der herved blive introduceret en væsentlig usikkerhed, som afhængigt af de enkelte vandværkers placering kan medføre, at der enten afgrænses et for stort opland (hvor grundvandsdannelsen f.eks. er større end 100 mm/år) eller for lille et opland. Træffes skøn på den sikre side, vurderes det at oplandet typisk vil blive overvurderet med en faktor 2-4.

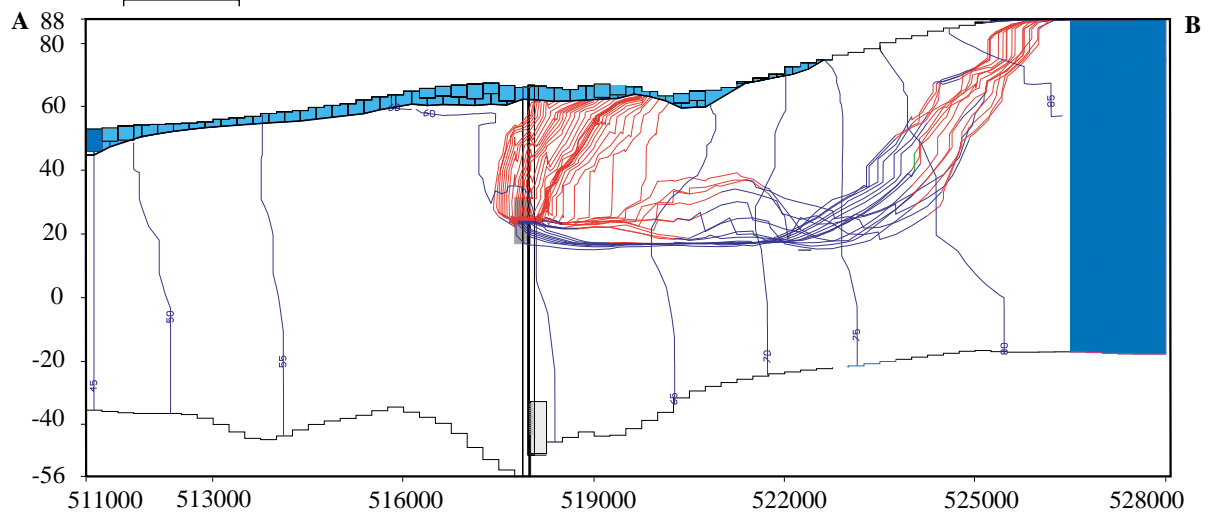
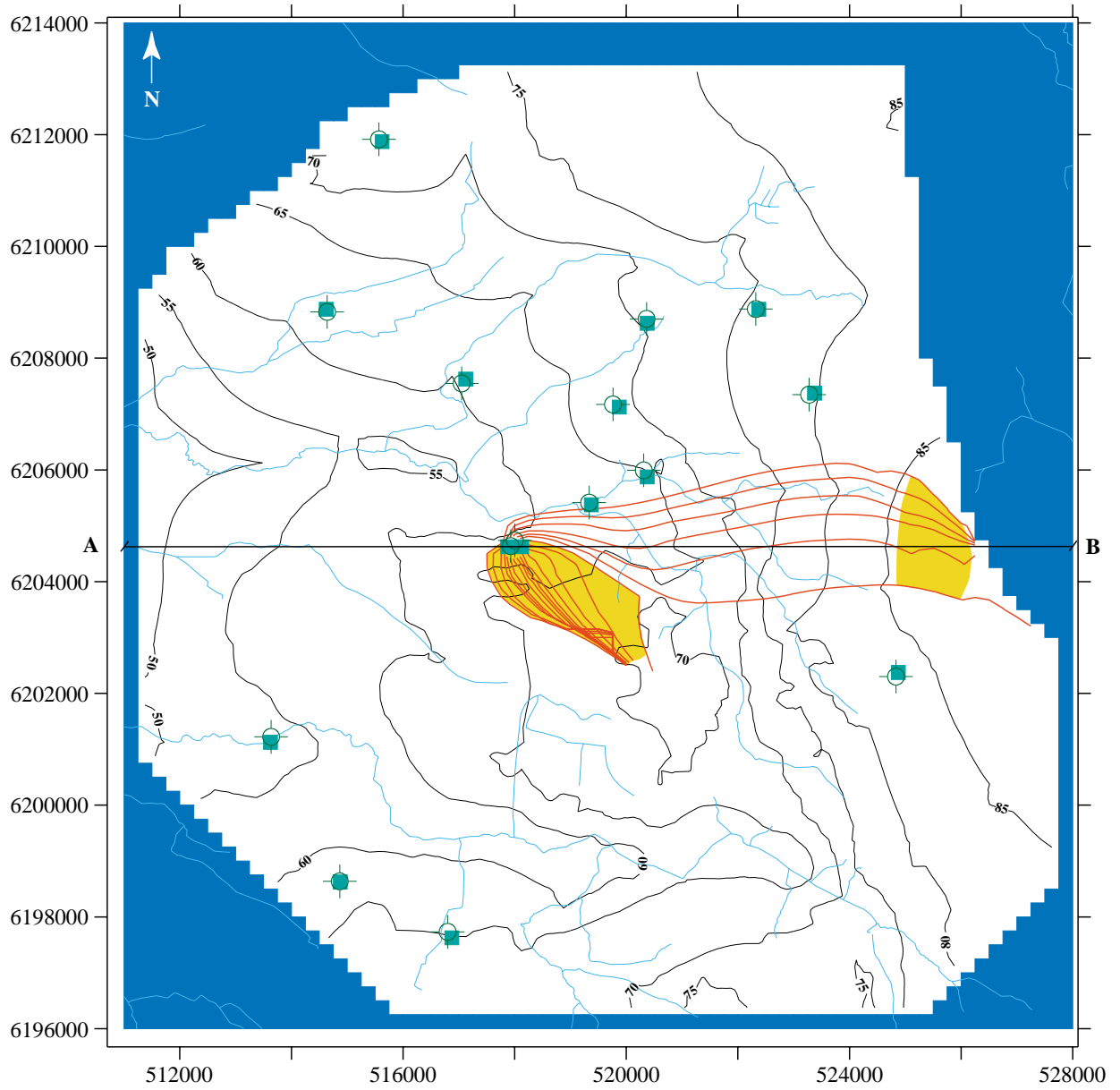
På grund af en yderligere usikkerhed på beliggenheden (ved projicering af IDFM op til terræn (infiltrationsområde) og usikkerhed om de nærmere geologiske forhold, forholdet mellem vertikal og horisontal strømning, foretrukne strømningsveje gennem moræneleren osv.), vurderes det at en typisk overestimering af indvindingsoplandet for forhold svarende til Østfyns resultater i en samlet vurdering af oplandet som kan være 3-5 gange større end det optimale. Benytter man kun en sikkerhedsfaktor på f.eks. 2, er der stor sandsynlighed for at en gennemført afgrænsning af et indvindingsopland 'rammer ved siden af' det opland som faktisk føder en konkret kildeplads.

Problemet med afgrænsning er tilsyneladende store for såvel vandværker filtersat i øvre som i dybere magasiner. Den afgørende faktor er formentlig hvorvidt der er tale om et flerlagsmagasin eller hvorvidt magasinforholdene er mere simple (f.eks. med et enkelt magasin evt. med et dæklag).

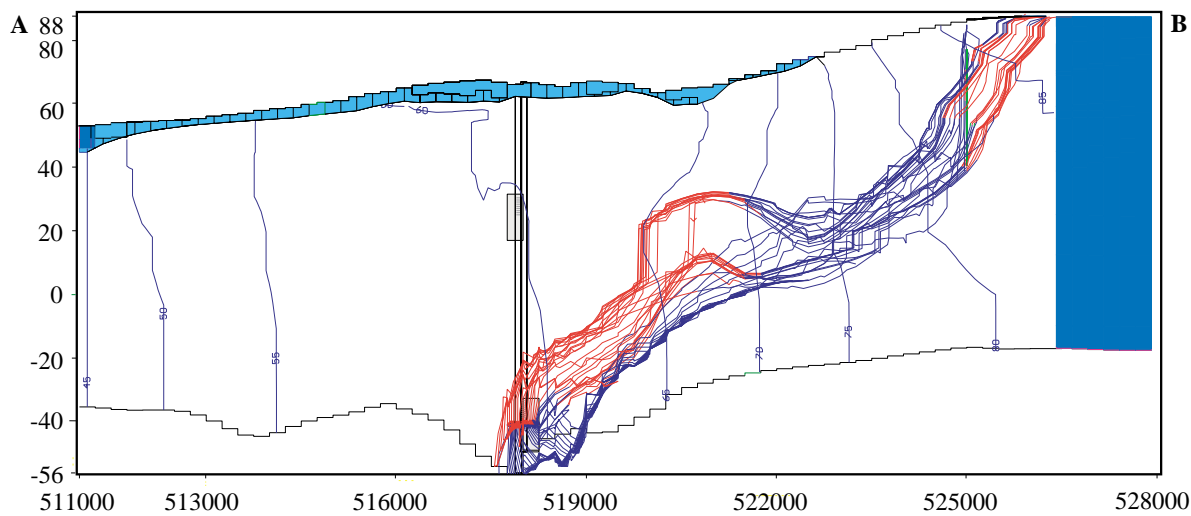
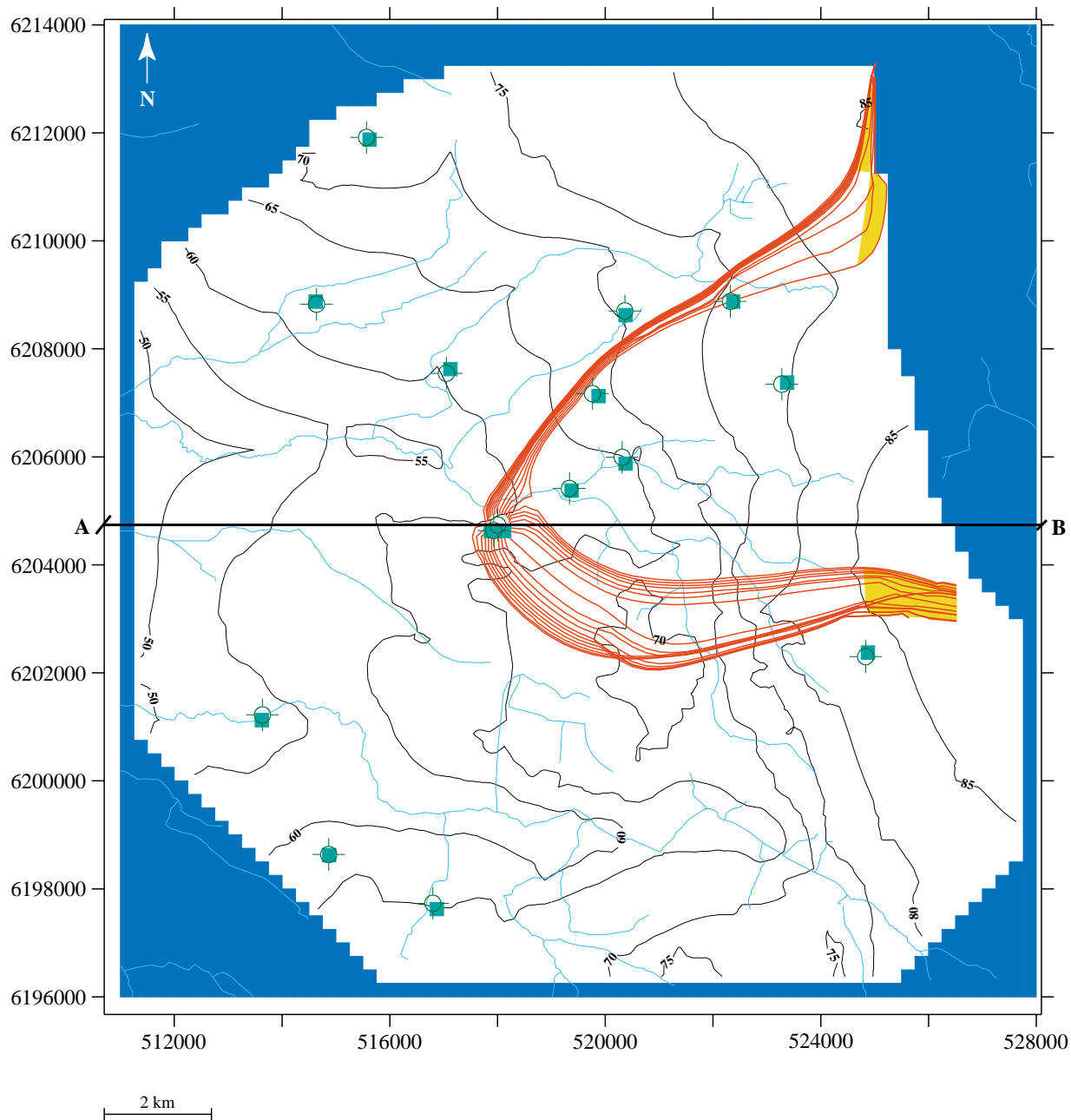
7.7.2 Partikelbanesimuleringer for Ejstrupholm

Partikelbanesimuleringerne for Ejstrupholm er baseret på MODPATH (Visual MODFLOW).

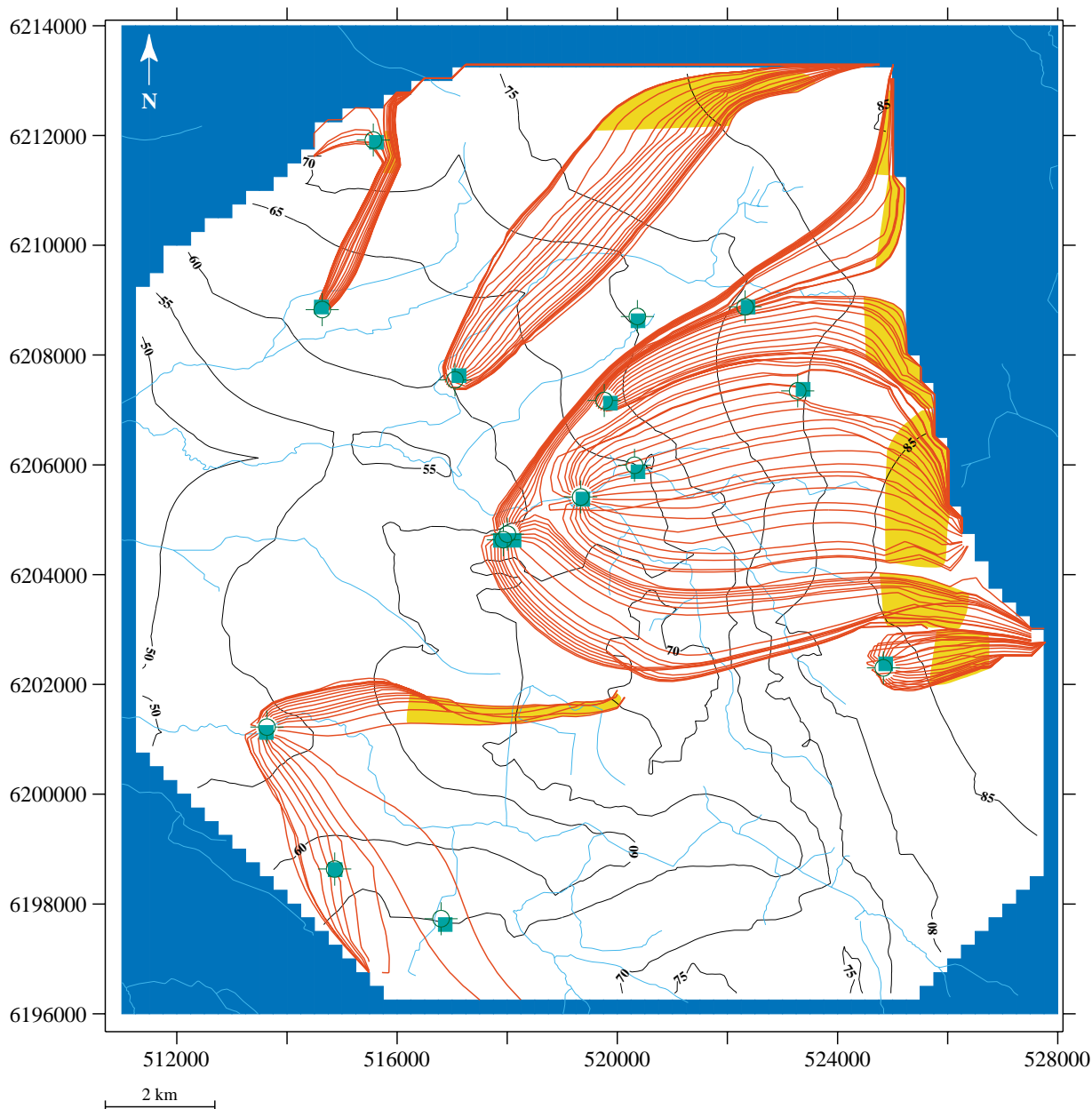
I figur 7.6 er vist simulerede partikelbaner fra Ejstrupholm vandværk med en filtersætning i et øvre magasin, som den så ud da der konstateredes atrazin i indvindingen. Infiltrationsområderne er vist med gul skravering. Det bemærkes af den "gamle" indvinding har infiltrationsområder dels sydøst for boringen og dels længere opstrøms ved hovedvandskællet mod øst. Bemærk også dette strømningsforløb jf. profilsnittet. Det samlede indvindingsopland fremgår ligeledes af figuren.



Figur 7.6 Simuleret indvindingsopland og infiltrationsområde for Ejstrupholm vandværk ved filtersætning fra øvre magasin (MODPATH partikelbanesimulering)



Figur 7.7 Simuleret indvindingsopland og infiltrationsområde for Ejstrupholm vandværk (MODPATH partikelbanesimuleringer)



Figur 7.8 Simulerede indvindingsoplande og infiltrationsområder for Ejstrupholm området for 7 vandværker (MODPATH partikelbanesimuleringer)

I figur 7.7 er vist simulerede partikelbaner fra Ejstrupholm vandværk med en filtersætning i et dybt magasin, som det ser ud i dag. Det fremgår at indvindingsoplandet består af to adskilte oplande. Denne opdeling skyldes at der nordøst for Ejstrupholm vandværk foregår en betydelig indvinding fra et dambrug, som påvirker indvindingsoplandet til vandværket. De tilhørende infiltrationsområder er placeret ved hovedvandskellet mod øst (mellem Skjern å og Gudenå systemerne).

I figur 7.8 er vist indvindingsoplande og tilhørende infiltrationsområder til syv vandindvindinger inden for modelområdet. Det fremgår af denne figur at de enkelte indvindinger påvirker hinandens indvindingsoplande.

Den gennemsnitlige nedsivning til lag 1 blev med modellen vurderet til 161 mm/år mens den dybe grundvandsdannelse blev vurderet til 36 mm/år. En afgrænsning af indvindingsoplandet er kompleks idet der lige omkring indvindingen ved Ejstrupholm er opadrettet gradient. Det grundvandsdannende opland skal derfor søges opstrøms mod øst. Med den givne case er der meget stor sandsynlighed for at man med simple metoder ender med et

indvindingsopland som ikke svare til de områder der bidrager med grundvandsdannelsen til vandværkets indvinding. Problemet kompliceres af at der et stykke opstrøms vandværket indvindes vand fra det dybe magasin til et dambrug, og at denne indvinding er større end vandværkets. Med den beskrevne geologi vurderes afgrænsning af indvindingsoplande kun at kunne gennemføres for områder hvor kvartære og miocæne vandførende lag er stort set sammenhængende.

7.7.3 Partikelbanesimuleringer for Sydvestjylland

Indvindingsoplande er vanskelige at afgrænse på grund af usikkerheder på grundvandsdannelsen. En afgrænsning indvindingsoplande ved en 3D partikelbanemodel (PATH3D) er vist i figur 7.10. Såfremt der i stedet var anvendt en simpel metode vurderes det, at det nok ville være muligt at afgrænse beliggenheden af indvindingsoplandet (dvs. opstrøms retning i forhold til kildeplads ud fra potentialebillede). Størrelsen af indvindingsoplandet og en nøjagtig placering kan dog næppe gennemføres, med mindre oplandet forsynes med en stor sikkerhedsmargin. Figur 7.3d viser at grundvandsdannelsen omkring vandværker i området er større end 250 mm/år hvorimod den gennemsnitlige kun er ca. 50 mm/år. En overvurdering med en faktor 5 er derfor sandsynlig, men på grund af usikkerheder på projiceringen til terræn (horisontal strømning), er en korrekt afgrænsning vanskelig.

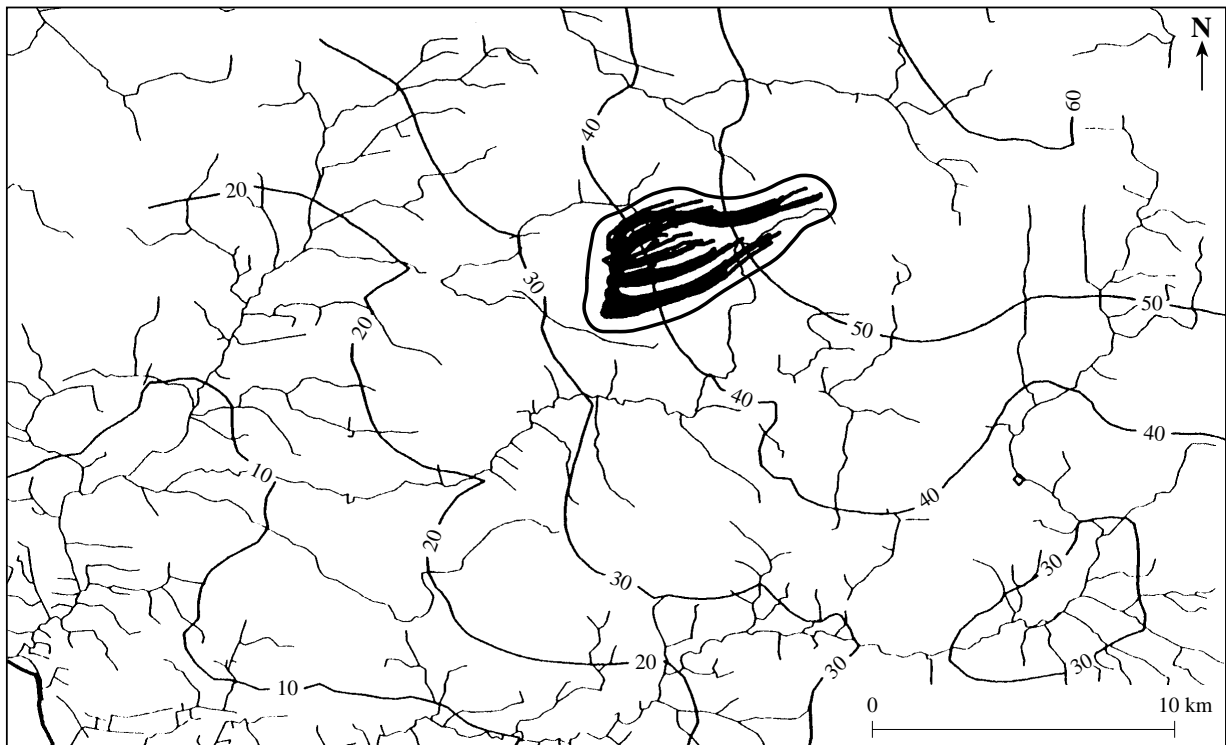


Fig. 7.10 Simuleret indvindingsopland ud fra partikelbaneberegning, Sneum å området.

7.8 Konsekvens af forøget vandindvinding

I figur 7.9 er vist simuleret grundvandsdannelse og perkolationstid med model ved en ny indvinding på 6 mio. m³/år centralt i modelområdet fra lag 8. Det fremgår at perkolationstiderne omkring den nye indvinding bliver stærkt reduceret i forhold til udgangssituationen hvorimod grundvandsdannelsen forøges betydeligt. I figur 7.10 er vist beregnede partikelbaner dvs. det beregnede indvindingsopland projiceret til terræn.

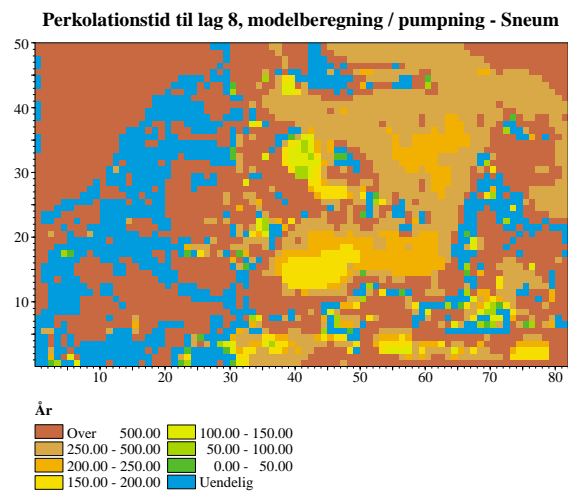
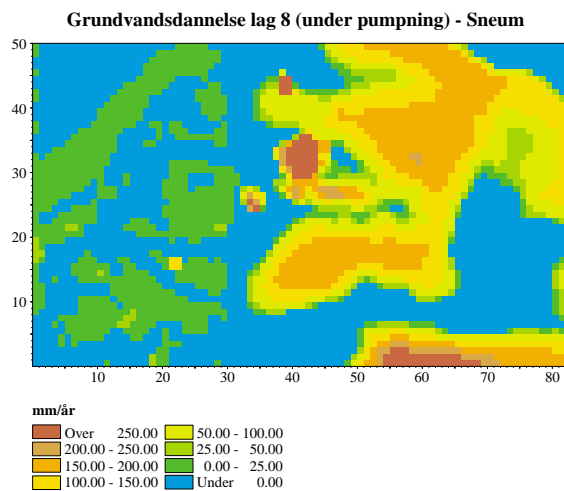


Fig.7.9 Grundvandsdannelse og perkolations tid ved ny indvinding på 6 mio. m³/år, Sneum å området.

8 Opsamling om simple kontra avancerede værktøjer

8.1 Metodevalg

På baggrund af eksemplerne ovenfor forsøges det i nærværende afsnit at sammenfatte metodevalget så det får gyldighed for spektret af geologiske forhold vi kender i Danmark. Simple værktøjer bygger på forenkede antagelser om de fysiske forhold, hvilket kan medføre større unøjagtigheder f.eks. ved afgrænsningen af beskyttelseszoner. Med mere avancerede værktøjer, som 3-D grundvandsmodeller, er det muligt nøjere at analysere komplekse hydrogeologiske områder. Manglen på geologisk og hydraulisk information vil dog ofte medføre at der kan være en betydelig usikkerhed på vurderinger foretaget med såvel simple metoder som 3-D grundvandsmodeller.

Valget står mellem følgende zoneringsprincipper:

1. Lertykkelseskort
2. Areal distribueret grundvandsdannelse
3. Afgrænsning af indvindingsopland
4. Grundvandets trykforhold
5. Transporttid gennem dæklag; inert stof
6. Stofspecifikke forhold i dæklag; nedbrydning (nitrat), sorption mobilitet (tungmetaller)
7. Stofspecifik transporttid i dæklag; densitet (DNAPL), sorption / mobilitet (PAH, cyanid)

De ovenfor gennemførte eksempler omfattede primært de dybe magasiner og var relevante med henblik på en nærmere vurdering af metodernes egnethed på sådanne magasiner. Kun i begrænset omfang blev de øvre magasiner beskrevet. I de udvalgte områder var det imidlertid de udvalgte dybe magasiner, som typisk var genstand for vandindvindingsinteresser.

Lertykkelseskort

Lertykkelseskort var ikke brugbare for Midtjylland området og kun delvist brugbare for Østfyn området. I situationer hvor der er vekslende vandførende og lavpermeable lag vurderes anvendelse af denne zoneringsmetode uegnet. Lertykkelseskort er kun anvendelige for et begrænset antal hydrogeologiske tolkningstyper, nemlig dem som udgøres af et sammenhængende dæklag over et vandførende lag. Ud fra figur 3.1 kan disse afgrænses til typerne 2B (Århus) og 2C (Ålborg). I visse tilfælde, hvor der ikke forekommer sekundære sandmagasiner, kan lertykkelseskort desuden anvendes for typen 4B (Fyn). De øverste 5-8 meter af moræneleren er typisk opsprækket og kan dermed fungere som et sekundært magasin. Dette medfører at brugen af lertykkelser bør kvalitetssikres ved opstilling af 3D grundvandsmodel.

Areal distribueret grundvandsdannelse

Den areal distribuerede grundvandsdannelse kan ikke kortlægges ved hjælp af simple metoder men forudsætter grundvandsmodel. I nogen situationer kan grundvandsdannelsen vurderes ud fra 2D model, hvor vandudvekslingen mellem øvre og dybere magasin er bestemt ved f.eks. lækage, men i langt de fleste tilfælde forudsætter en pålidelig kvantificering af den areal distribuerede grundvandsdannelse opstilling af en dynamisk hydrologisk model, der inkluderer en 3D grundvandsmodel.

Afgrænsning af indvindingsoplande

Forudsætter i de fleste tilfælde en grundvandsmodel, idet et væsentligt input udgøres af den areal distribuerede grundvandsdannelse (se ovenfor), men også randbetingelser, magasinfor-

hold og heterogeniteter har stor betydning. En afgrænsning af IDFM oplande kan baseres på simple metoder men er usikker på grund af et manglende kendskab til grundvandsdannelsens størrelse for specielt dybere magasiner. En afgrænsning af infiltrationsområdet til en given vandindvinding forudsætter i de fleste tilfælde en nærmere analyse hvor der bl.a. indgår en 3D-partikelbane-simulering.

Grundvandets trykforhold

Grundvandets trykforhold og zoneringsud fra områder med infiltration/-udstrømning til f.eks. vandløb kan bedst gennemføres i situationer hvor grundvandsmagasinsystemet består af et flerlagssystem (minimum 2 vandførende lag adskilt af f.eks. lavpermeabelt lerlag). Metoden forudsætter imidlertid ved brug af simple metoder indsamling af detaljerede synkronpejlinger, og kan i givet fald give rimelige resultater. Brug af 3D grundvandsmodeller giver mere pålidelige resultater, og forudsætter ikke så detaljerede pejledata.

Transporttid gennem dæklag

Denne zoneringsmetode kan gennemføres for øvre magasiner på baggrund af nettonedbøren og simpel stempelstrømning, men der bør i givet fald tages hensyn til såvel lodrette sprækker som sandvinduer, idet transporttiden er tæt knyttet til sådanne heterogeniteter. Der bør ved brug af metoden foretages aldersdatering f.eks. ved CFC med henblik på dokumentation af den vurderede transporttid. For dybere magasiner forudsætter metoden brug af 3D grundvandsmodeller.

Stofspecifikke forhold

Nitratudbredelse kan evt. søges vurderet med udgangspunkt i korrelationer mellem på den ene side arealdistribueret grundvandsdannelse, perkolationstid og lertykkelser samt på den anden side en vurdering af geologi, redoxforhold, farveskifte og vandanalyser for nitrat, altså ved brug af simple metoder kombineret med resultater af f.eks. 3D strømningsmodel eller partikelbanemodul. 3D stoftransportmodellering forudsætter antageligt indsamling af yderligere data men kan være relevant i udvalgte områder.

8.2 Diskussion af diskretisering

I den gennemførte afprøvning af zoneringsprincipper blev der anvendt en maskevidde på mellem 250 og 500 m. Dette er en typisk maskevidde ved regional modellering.

Valget af vertikal diskretisering og maskevidde i grundvandsmodeller bør afpasses de nærmere geologiske forhold og indvindingsforhold. I dele af Østjylland og Viborg amt er grundvandsmagasinerne dækket af moræneler, som er forstyrrede af isens bevægelser (dislocerede). I Vestjylland, Nordjylland og Himmerland kan en zoneringsmetode foretages med en større maskevidde, afhængigt af de nærmere forhold. På øerne vil en maskevidde mellem diskretiseringen for Østjylland og Vestjylland formentlig være optimalt. Detaljerede vurdering kan evt. foretages med mere detaljerede submodeller for udvalgte områder (partikelbanesimuleringer). Den vertikale diskretisering bør afpasses forekomsten af vandførende og lavpermeable lag, altså med udgangspunkt i den hydrogeologiske tolkningsmodel. Regionale modeller vil derfor typisk kunne diskretiseres med maskevidde mellem 100 og 500 m, hvorimod submodeller evt. kan yderligere forfines (20-100 m) afhængigt af behov for detaljering.

8.3 Kombination af metoder

Da modeller altid vil give en forenklet beskrivelse af forholdene med midlede værdier for beregningsmaskerne er der ved zoneringsmetoden behov for at sammenholde resultater af modelberegninger (griddede data) med detaljerede kortlægninger f.eks. baseret på geofysik eller jordartskort samt knytte relationer til punktinformationer (f.eks. pejlinger, aldersdateringer, kemiske analyser osv.). Der er antageligt behov for at kunne håndtere de forskellige datatyper ved hjælp af GIS systemer.

Brugen af 3-D modeller vurderes dermed et krav i forbindelse med zonerings i de fleste tilfælde ved vurdering af arealdistribueret grundvandsdannelse, afgrænsning af indvindingsoplande, vurdering af grundvandets trykforhold og ved vurdering af transporttid gennem dæklag. I forbindelse med simple magasiner kan der i mange situationer anvendes simple metoder, men en optimal afgrænsning af de særligt sårbare arealer forudsætter en metodik baseret på en rumlig såvel som dynamisk beskrivelse af forholdene, dvs. brug af en 3-D model.

Det skønnes at simple metoder typisk vil give afgrænsninger af arealer, f.eks. indvindingsoplande, som vil være mindst 2 gange større end ved en modelbaseret afgrænsning.

9 Konklusion

Kortlægning af infiltrations- og udstrømningsområder kan ske rimeligt præcist, såfremt der indsamles forholdsvis detaljerede synkronpejlinger i et stort antal boringer filtersat i både øvre og dybere magasin. Ved brug af en hydrologisk model (incl. en 3D grundvandsmodel) vil den samme afgrænsning kunne opnås ved et færre antal pejlinger, ligesom at konsekvenser af ændringer i indvinding, nettonedbør og arealanvendelse for gradientforholdene vil kunne vurderes med en sådan model.

Den arealdistribuerede grundvandsdannelse kan ikke vurderes med simple metoder, men forudsætter brug af hydrologisk model incl. 3D-grundvandsmodel.

Vurdering af perkolationstid ved simpel stempelstrømning kan primært anbefales til vurderinger for det øverste grundvandsmagasin, hvor usikkerheden på den arealdistribuerede grundvandsdannelse (vurderet ud fra f.eks. nettonedbøren) er væsentlig mindre end for dybe magasiner, hvor grundvandsdannelsens fordeling ikke kendes ved simple metoder. Ved mere komplekse magasinforhold forudsætter en vurdering af perkolationstiden gennem dæklag til det primære magasin brug af 3D-partikel-banemodul, idet de horisontale strømninger og præferentielle strømningsveje er helt centrale.

Afgrænsning af indvindingsoplande ved simple metoder er meget usikkert idet den arealdistribuerede grundvandsdannelse ikke er kendt men må baseres på et skøn. Såfremt man ønsker at afgrænse indvindingsoplandet og det tilhørende infiltrationsområde til et vandværk, er en 3D grundvandsmodel med tilhørende partikelbanesimulering den eneste brugbare mulighed, idet samtlige påvirkninger af vandbalance i et område, øvrige indvindinger, randbetingelser (bl.a. udveksling med vandløb) og heterogeniteter i magasinssystemet skal indgå i en samlet vurdering af infiltrationsområderne. Ved komplekse magasinforhold vil der dog selv med en grundvandsmodel fortsat være stor usikkerhed på den præcise placering af infiltrationsområderne til vandværkerne.

Det er vurderet, at en zonerings alene baseret på en kortlægning af lertykkelser over grundvandsmagasinet ikke er tilstrækkelig. Selv i områder med tykke lerlag (eller akkumulerede lerlag) viser modelresultater at der forekommer områder med væsentlig grundvandsdannelse (som følge af præferentielle strømningsveje bl.a. horisontalt gennem sandlag eller øvre opsprækkede lerlag).

Stofspecifikke forhold i dæklag og grundvandsmagasiner kan inddrages i zonerings og når det gælder nitrat og tungmetaller er det vurderet at videngrundlaget er til stede for en afgrænsning. Når det gælder miljøfremmede stoffer (bl.a. pesticider), vurderes det at et tilstrækkeligt videngrundlag ikke vil være tilstede før tidligst om ca. 5 år for en nærmere stofspecifik vurdering i et konkret område. Den stofspecifikke vurdering er ikke gennemført i større omfang i forbindelse med afgrænsningen af drikkevandsområder (Regionplan 97). Indtil der foreligger et videngrundlag for f.eks. pesticider er den eneste mulighed at anvende hydrauliske metoder til en foreløbig afgrænsning af pesticidfølsomme områder, bl.a. ved en afgrænsning af infiltrations- og udstrømningsområder eller infiltrationsområder til vandværker f.eks. beliggende uden for områder med særlige drikkevandsinteresser. En vurdering af muligheden for præferentiel strømning gennem lerlag, bl.a. gennem sprækker, er dog formentlig en nøgleparameter.

En væsentlig andel af Danmarks nuværende vandforsyning er i dag baseret på dybe magasiner. Rapporten viser at zonerings af såvel øvre som dybe grundvandsmagasiner ved hjælp af simple metoder vil medføre meget store usikkerheder og dermed arealkrav når det gælder de afgrænsede sårbare områder. Kun ved meget simple magasinforhold er simple metoder anvendelige.

Hydrologiske modeller eller grundvandsmodeller er derfor nødvendige med henblik på at forstå grundvandsmagasinsystemerne og deres beskyttelse samt med henblik på at give input til yderligere kortlægning og monitorering.

10 Referencer

Andersen, J.K og T. Bliksted, 1997: WaterInfo - et værktøj til sikring af rent drikkevand. Vandteknik nr. 4, maj 1997.

Bengtsson, M-L., 1996: Hydrogeologisk sårbarhedsklassificering som verktøj i kommunal planering. Med exemplificering i Lerums kommune. Licentiatoppsats. Chalmers Tekniske Högskola. Geologiske Institutionen. Publ. A 81. Göteborg 1996.

Blandford, T.N. og P.S. Huyakorn, 1990: WHPA: a modular semi-analytical model for the delineation of wellhead protection areas, U.S. EPA, Office of Ground-Water Protection.

Delin, G.N. og J.E. Almendinger, 1993: Delineation of Recharge Areas for Selected Wells in the St. Peter-Prarie du Chien-Jordan Aquifer, Rochester, Minnesota. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2397.

DHI, 1993: MIKE-SHE Water Movement - short description.

Ernstsen, V., 1996: Nitrate reduction in Clayey subsoil. Ph.D. Thesis. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. 148 p.

Ernstsen, V., 1997. Personlig kommunikation

Ernstsen, V. og L. Thorling, 1997: Geokemiske Miljøer og nitrat i et komplekst opbygget grundvandsmagasin ved Grundfør. Grundvandsforskning i Danmark 1992-96. ATV-komiteen vedrørende grundvandsforurening. Schæffergården, 23. april 1997.

Ernstsen, V, og L. Thorling, in prep: Redox zones - A valuable tool in the study of nitrate in heterogeneous aquifers.

Ernstsen, V., P. Gravesen, B. Nielsson, J. Fredericia, W. Brüsch og S. Genders, 1990: Transport og omsætning af N og P i Langvad Å's opland. Baggrundsrapport - Databilag. Juli 1990. Intern rapport nr. 44 - 1990. Isotopcentralen/ATV og DGU.

Evers, S. og D. Lerner, 1995: Zones of certainty and uncertainty in estimating borehole catchments. Groundwater Quality; Remediation and Protection (Proceedings of the Prague Conference, May 1995). IAHS Publ. no. 225, 1995.

Fitts, C.F., 1994: TWODAN - Two-Dimensional Analytic Groundwater Flow Model & TWODAN Manual. Scarborough, USA.

Franz, T. og N. Guiguer, 1990: FLOWPATH, two-dimensional horizontal aquifer simulation model, Waterloo Hydrogeologic Software, Waterloo, Ontario, 74 p.

GEUS, 1995: Grundvandsovervågning 1995.

Gravesen, P., 1997. Personlig kommunikation

Gravesen, P. & Hansen, M., 1997: Usikkerheder ved geologiske modeller, Beskrivelse af grundvandsmagasiner i komplekse geologiske områder. ATV-møde Schæffergården. 23. april 1997.

Grundvandsgruppen, 1997. Danmarks Grundvand - En truet ressource. Det Strategiske Miljøforskningsprogram.

Henriksen, H-J., Hansen, M. & Dahlstrøm, K. 1996. Hydrological data worth associated with implementation of groundwater protection zones. NHP report no. 40. NHK 96 Aku-

reyri, Iceland

Henriksen, H:J., Morthorst, J., Nyegaard, P. & Elbeling, B., 1995a. Orienterende undersøgelse af vandindvindingsforhold for Ejstrupholm vandværk. Oktober 1995. DGU kunderapport nr. 63 - 1995.

Henriksen, H:J., Harrar, B., Morthorst, J., Nyegaard, P. & Dahl, M. 1995b. Nye indvindingsmuligheder for Esbjerg kommune. Fase IV - model. DGU kunderapport nr. 51 - 1995.

Kelstrup, N., 1984: Kortlægning af perkolationstiden. Hydrologi og Vandkvalitet. Den 8. Nordiske Hydrologiske Konference, NHK-84. Nyborg Strand 6.-8. August 1984. NHP rapport nr. 5.

Kelstrup, N., Jacobsen, O.S., Bækgaard, A. & Andersen, L.J., 1984: Grundvandets sårbarhed og kvalitet, Danmark (under trykning).

Kinzelbach, W. og S. Vassolo, 1996: Determination of capture zones of wells by Monte Carlo simulation. Calibration and Reliability in Groundwater Modeling (Proceedings of the ModelCARE 96 Conference held at Golden, Colorado, September 1996). IAHS Publ. no. 237, 1996.

McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh, 1988: A modular finite-difference ground-water flow model, Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1, USGS 576 p.

Miljøstyrelsen, 1995a.: Udpegning af områder med særlige drikkevandsinteresser. Vejledning fra Miljøstyrelsen, nr. 4 - 1995.

Miljøstyrelsen, 1995b: Zoneopdelt grundvandsbeskyttelse. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 14 - 1995.

Miljøstyrelsen, 1995c: Metoder til udpegning af indvindingsoplande. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen, nr. 8 - 1995.

Miljøstyrelsen, 1995d: Overvågning af grundvandet baseret på nye geofysiske målemetoder. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen, nr. 11 - 1995.

Miljøstyrelsen, 1995e: Klassificering af grundvandsressourcen. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen, Nr. 6 - 1995.

Miljøstyrelsen, 1995f. Kortlægning af den maksimalt tilladelige nitratudvaskning. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 10 - 1995.

Miljøstyrelsen, 1995g: System til prioritering af punktkilder. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen, nr. 19 - 1995.

Miljøstyrelsen, 1996. Kemiske stoffers opførsel i jord og grundvand: Bind 1 og 2. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 20 - 1996.

Miljøstyrelsen, 1997: Drikkevandsudvalgets betænkning. 17. december 1997. Foreløbigt tryk.

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.

Strack, O.D.L., 1988: Groundwater Mechanics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 732 p.

U.S. EPA, 1987: Guidelines for delineation of wellhead protection areas, U.S. EPA-Office of Ground-Water Protection.

Zeng, C., 1989: PATH3D, S.S. Papadopoulos & Assoc., Rockville, MD.

Forudsætninger for beregning af transporttid ved stempelstrømningsmodel

Forenklinger

Den i afsnit 4.2.1 beskrevne metode til beregning af transporttiden gennem dæklag bygger på en række forenklinger, hvoraf hovedparten generelt fører til undervurdering af perkolationstiden og dermed overvurdering af sårbarheden. Forenklingerne er altså generelt "på den sikre side".

Blandt de mest grundlæggende forenklinger er:

- Perkolation antages at finde sted som stempelstrømning
- Der ses bort fra præferentiel strømning i moræneler
- Der ses bort fra fingerstrømning i sandlag
- Der benyttes total porøsitet frem for effektiv porøsitet i den mættede zone
- Der ses bort fra dyrkningslag

Perkolationstiden beregnes under antagelse af lodret stempelstrømning i både den umættede og den mættede zone. I den umættede zone kan vandbevægelsen ofte beskrives som en lodret stempelstrømning med dispersion. Metoden ser altså bort fra dispersionen i den umættede zone. For den mættede zone, hvor strømningens største hastighedskomponent generelt er vandret, er antagelsen af stempelstrømning for lokale betragtninger kritisk. For regionale betragtninger giver forenklingen dog rimelige resultater.

Pga. mangel på data om effektiv porøsitet benyttes for den mættede zone total porøsitet fremfor effektiv porøsitet. Dette medfører en undervurdering af sårbarheden.

Der ses desuden bort fra dyrkningslag som findes i hovedparten af Danmark. Perkolationstiden undervurderes dermed og sårbarheden overvurderes.

Uden brug af en grundvandsmodel kan der ikke tages hensyn til afdræning og afstrømning fra øvre reservoirer. Afdræning og afstrømning fra øvre reservoirer vil nedsætte perkolationen til lavereliggende reservoirer. Ved at se bort fra denne reduktion af perkolationen undervurderes perkolationstiden, hvilket fører til en overvurdering af sårbarheden.

Valg af parameterværdier

Udover forenklingerne kan også benyttes sikre valg af parameterværdier som metode til at "være på den sikre side". Den hydrauliske ledningsevne stiger med vandindholdet i den umættede zone og med porøsiteten i den mættede zone. Ved at tilstræbe anvendelse af lave værdier af vandindhold og porøsitet opnås en derfor undervurdering af den hydrauliske ledningsevne og dermed af perkolationstiden, mens sårbarheden overvurderes. Følgende værdier (Kelstrup, 1984) kan f.eks. benyttes for vandindholdet i den umættede zone (Wu)

og porøsiteten i den mættede zone (am):

	Wu	am
Smeltevandssand og -grus	0,10	0,30
Smeltevandsler og -silt	0,25	0,30
Morænesand	0,10	0,30
Moræneler og -silt	0,25	0,30
Yoldialer	0,25	0,30
Kvartssand og glimmersand	0,10	0,30
Grønsandskalk		0,20
Danienkalk	0,15	0,20
Skrivekridt	0,30	0,40
Faste bjergarter på Bornholm		0,10

Ovenstående er baseret på Kelstrup og andre (1984), Kelstrup (1984) og Bengtsson (1996).