



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

BNBO

Beregningsprocedure

2020

Udgiver: Miljøstyrelsen

Indhold

1.	Indledning	4
2.	Boringsnære beskyttelsesområder (BNBO)	5
3.	Valg af beregningsmetode og forudsætninger	7
4.	Cirkelmetoden	10
5.	AEM-metoden	12
6.	Numerisk grundvandsmodel	14
7.	Beregningsparametre (valg af data)	15
7.1.	Strømningstiden til boringen	15
7.2.	Effektiv porøsitet	15
7.3.	Indvindingsmængde	16
7.4.	Magasintykkelse	17
7.4.1.	Cirkelmetoden	17
7.4.2.	AEM-metoden	17
7.4.3.	Numerisk grundvandsmodel	17
7.5.	Magasintykkelse for boringsindtag	17
7.6.	Hydraulisk konduktivitet	19
7.6.1.	Cirkelmetoden	19
7.6.2.	AEM-metoden	19
7.6.3.	Numerisk grundvandsmodel	19
7.7.	Transmissivitet	19
7.8.	Gradient og strømningsretning	20
7.8.1.	Cirkelmetoden	21
7.8.2.	AEM-metoden	21
7.9.	Magasinspecifikt potentialekort	21
8.	Optegning af BNBO	21
9.	Referencer	23

1. Indledning

Formålet med dette dokument er at beskrive Miljøstyrelsens procedure for afgrænsning af boringsnære beskyttelsesområder (BNBO). BNBO afgrænses af Miljøstyrelsen for alle aktive almene vandforsyningsboringer med en gældende indvindingstilladelse. BNBO skal ses som et element i den målrettede grundvandsbeskyttelse.

Afgrænsningen af BNBO har til formål at fastlægge en administrativ ramme for den målrettede grundvandsbeskyttelse rettet mod de almene vandforsyningsboringers nærområde. Inden for BNBO kan risikoen for forurening af miljøfremmede stoffer i drikkevandet være øget, som følge af begrænset transporttid af en eventuel forurening til boringen, højere koncentrationer grundet manglende opblanding og under særlige geologiske og/eller hydrologiske forhold øget grundvandsdannelse, som følge af afsænkning af grundvandets trykniveau.

Det blev med lov om ændring af lov om miljøbeskyttelse og lov om vandforsyning m.v. af 23. januar 2018 bestemt, at BNBO udpeges for alle almene vandforsyningsboringer. Udpegning af BNBO sker i bekendtgørelse om udpegning af drikkevandsressourcer med hjemmel i vandforsyningslovens^a § 11 a, stk. 1, nr. 6. Tidligere har en række kommuner afgrænset BNBO ud fra den på det givne tidspunkt gældende vejledning. De kommunalt beregnede BNBO blev udpeget med den førstkommende bekendtgørelse om udpegning af drikkevandsressourcer efter ovennævnte lovændring.

Idet Miljøstyrelsen er myndighed for afgrænsning af BNBO, henvender nærværende procedure sig primært til Miljøstyrelsens fagkontor for grundvandskortlægning og konsulenter, der udfører grundvandskortlægningsopgaver for Miljøstyrelsen. BNBO, der skal udpeges med bekendtgørelse om udpegning af drikkevandsressourcer, skal følge nærværende vejledning.

Denne procedure erstatter Miljøstyrelsens tidligere beregningsprocedure for BNBO¹. Miljøstyrelsen har forud for fastsættelse af en ny beregningsprocedure bedt GEUS om at vurdere BNBO beregningskonceptet². Miljøstyrelsen har med nærværende beregningsprocedure taget afsæt i Miljøstyrelsens BNBO vejledning fra 2007 og tilhørende præciserende notater samt GEUS' vurdering af BNBO beregningskonceptet. Proceduren vil blive benyttet fremadrettet ved etablering af nye boringer til almene vandforsyninger eller ved væsentligt ændrede indvindingsforhold. BNBO er som udgangspunkt et element af en indmeldt grundvandskortlægningsopgave.

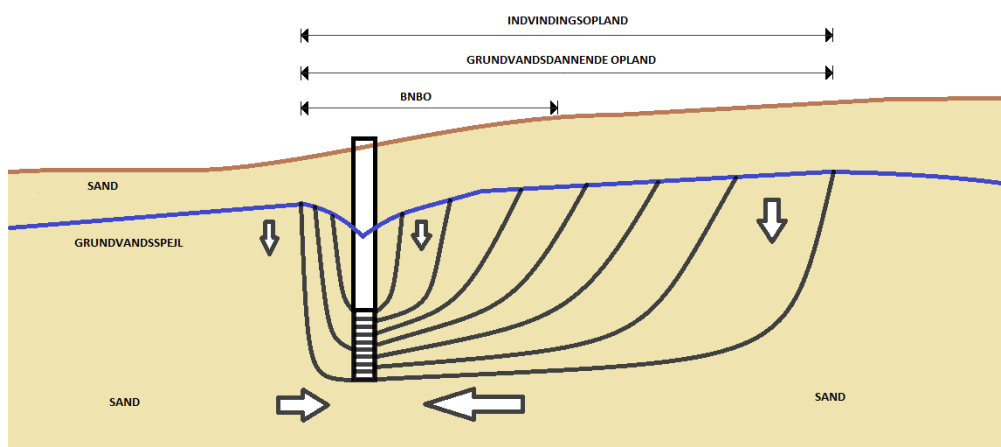
^a [Lovbekendtgørelse nr. 118 af 22. februar 2018 om vandforsyning.](#)

2. Boringsnære beskyttelsesområder (BNBO)

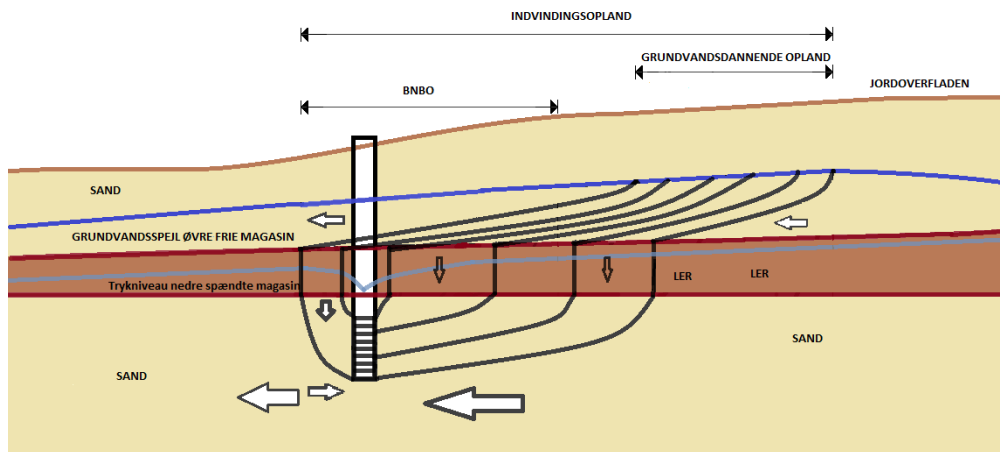
Et boringsnært beskyttelsesområde (BNBO) er en administrativ beskyttelseszone, der udlægges boringsnært omkring alle aktive indvindingsboringer til almene vandforsyninger. I forbindelse med afgrænsningen af BNBO, skal arealet, formen og placeringen af arealet fastsættes.

BNBO afgrænses som arealet på jordoverfladen, hvorunder vandet, der strømmer til boringen, har en given transporttid. Miljøstyrelsen har valgt at transporttiden fastsættes til ét år. Konceptuelt kan BNBO således forstås som et étårs indvindingsopland. Se illustrationerne figur 2.1. og figur 2.2.

Vand, der falder som regn på jordoverfladen inden for BNBO, vil infiltrere gennem jordlagene i den umættede zone til den mættede zone (eller strømme af ved jordoverfladen). Alt efter den geologiske opbygning vil vandet inden for BNBO sive ned i grundvandsmagasinet til boringens indtag, hvor det oppumpes til drikkevandsformål. Der kan være tilfælde, hvor vandet, der nedsiver inden for BNBO, ikke når boringens indtag grundet den geologiske opbygning og herunder grundvandets strømningsmønstre. Alt eller hovedparten af det grundvand, der oppumpes, kan derved være dannet længere væk, og der er ikke nødvendigvis i alle tilfælde grundvandsdannelse inden for BNBO. Overordnet kan der dog forekomme en øget nedadrettet grundvandsstrømning tæt på boringen, grundet trykfald.



Figur 2.1 Illustration af et BNBO i et frit sandmagasin uden dæklag.



Figur 2.2 Illustration af et BNBO for en boring i et spændt sandmagasin, overlajret af et lerdæklag og et øvre frit sand magasin.

I opsprækkede materialer, kan der være øget nedsivning fra overfladen grundet en ofte hurtigere grundvandsstrømning her end i resten af jordmatriksen. Dette eksempelvis i dobbeltporøse medier som kalk eller opsprækket ler. Med en kortere transporttid til grundvandsmagasinet kan der være øget risiko for forurening. Endvidere kan der ved stor nedbørsintensitet i en ellers umættet zone opstå mættede forhold i de dobbeltporøse aflejringer, hvorved der kan ske hurtigere passage gennem den umættede zone.

Når der pumpes fra en boring, sænkes trykket i boringen, hvilket giver en sænkning af grundvandsspejlet. Ved en lokal sænkning af trykket i boringen kan vandpartikler strømme med øget hastighed mod boringen. Dette kan lokalt påvirke strømningsmønstret omkring boringen og derved medføre øget nedadgående grundvandsstrømning. Ændret trykniveau kan endvidere bewirke ændrede redox- og stoftransportforhold tæt på boringen og derved ændret (evt. øget) sårbarhed.

Ved afgrænsning af BNBO bør ovenstående geologiske og hydrologiske forhold tages i betragtning.

3. Valg af beregningsmetode og forudsætninger

I dette afsnit præciseres valget af BNBO beregningsmetode, og de forudsætninger og overvejelser, der skal ligge til grund for et sådant valg. Generelt anvendes simple beregningsmetoder til simple 2D strømningsforhold, og mere avancerede metoder anvendes til komplekse strømningsforhold. BNBO beregnes på baggrund af den samlede tilladelse for et anlæg, hvor tilladelsen fordeles ud på vandforsyningens indvindingsboringer.

Til brug for vurderingen af kompleksiteten af strømningsforholdene omkring indvindingsboringen skal der opstilles en indledende konceptuel hydrogeologisk forståelsesmodel^{3,4}. Denne skal indeholde alle væsentlige oplysninger om grundvandspotentiale, geologisk kompleksitet, evt. flerlags strømning samt randbetingelser for strømningen, således at valget af BNBO beregningsmetode kvalificeres bedst muligt. Der bør i modellen skelnes mellem A. Simple 2D strømningsforhold og B. Komplekse strømningsforhold.

A. Simple 2D strømningsforhold

Simple strømningsforhold kan antages i modeller, hvor grundvandsmagasinet består af kvartære og miocæne sandlag, hvor der ikke er kontakt til andre magasiner (flerlagsstrømning). Det kan være dybe magasiner i begravede dale eller overfladenære magasiner beliggende under grundvandsspejlet.

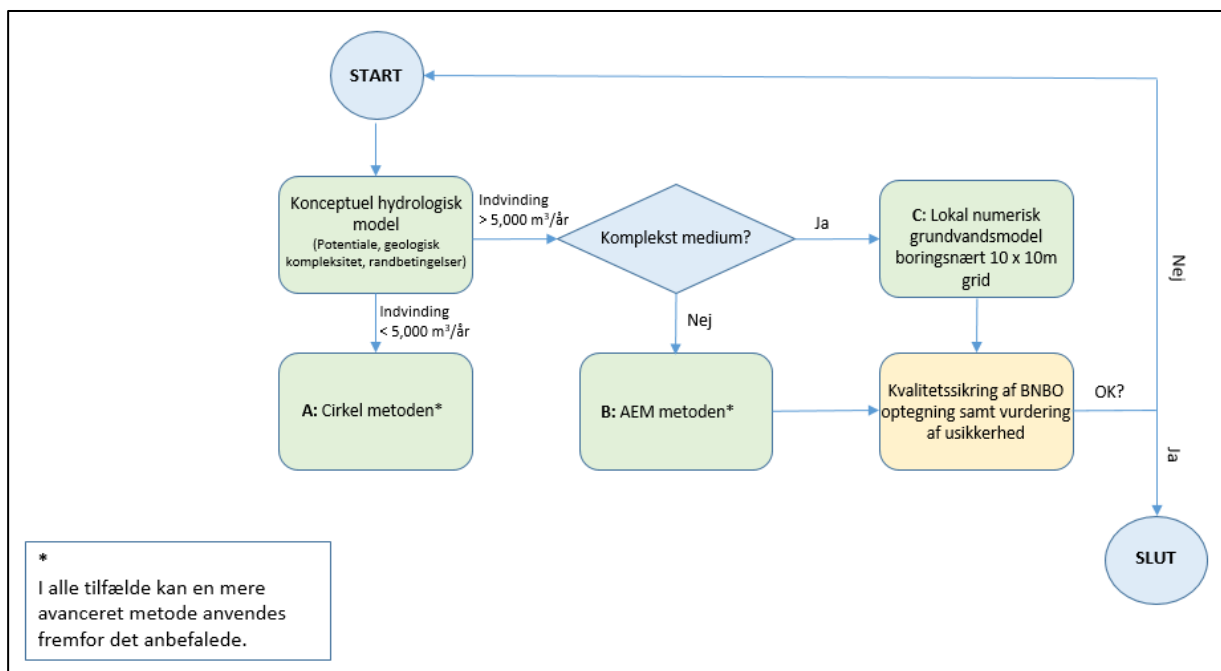
B. Komplekse strømningsforhold

Der indvindes i Danmark betydelige mængder grundvand fra kalkbjergarter. Strømningen i kalken er meget kompleks, fordi kalken er opsprækket i mere eller mindre grad, og vandstrømmen derfor primært foregår i sprækker i kalken. Dette er især tilfældet tæt på indvindingsboringen indenfor BNBO, hvor der ikke kan antages ligevægt mellem matrix og sprækker.

Sandmagasiner med dæklag af opsprækket moræneler betragtes som komplekse 3D strømningsforhold.

Valg af beregningsmetode

Processen for valg af metode samt efterfølgende vurdering af usikkerhed og kvalitet fremgår af figur 3.1.



Figur 3.1: Flow diagram, der skal anvendes til valg af BNBO beregningsmetode.

Metodevalget afhænger af kompleksiteten af den konceptuelle forståelsesmodel dvs., om der er tale om simpel 2D strømning i magasinet eller komplekse forhold, der kræver mere avancerede metoder (figur 3.1). Det skal også vurderes, om der er nok data til rådighed til at vurdere strømningsforholdene med rimelig høj grad af sikkerhed.

For små indvindinger mindre end ca. 5.000 m³/år anbefaler MST at bruge cirkelmetoden, hvis grundvandsspejlet er tilnærmelsesvis fladt, og simpel 2D strømning kan antages i magasinet. Cirkelmetoden anbefales ikke ved overlappende BNBO fra nærliggende boringer, da det er vanskeligt at kompensere korrekt for det overlappende areal.

For større indvindinger (≥ 5.000 m³/år), hvor der kan antages simpel 2D strømning, anbefales som udgangspunkt AEM metoden (figur 3.1). AEM bør også anvendes i tilfælde af tætliggende boringer samt tilfælde, hvor grundvandsspejlet ikke er fladt.

Numeriske modeller muliggør komplicerede 3D beregninger af strømningsmønstret til magasinet, som ikke kan udføres ved brug af simple metoder. Hvis det vurderes, at der er behov for beregning af strømningsmønstre i 3D, fx ved flerlags strømning mellem magasiner eller tilstedeværelse af dæklag af opsprækket moræneler, skal en numerisk model anvendes ved BNBO beregningen (figur 3.1). Metoden skal også anvendes ved komplekse hydrogeologiske forhold som magasiner i opsprækket kalk samt magasiner i sprækkedale på Bornholm. Ved store kildepladser, hvor sænkning af grundvandet i et større område må forventes, bør BNBO i alle tilfælde beregnes med en numerisk grundvandsmodel.

Numeriske modeller kan anvendes i stedet for simple metoder, hvis det skønnes at give et forbedret beregningsresultat.

Hvis en pålidelig konceptuel model ikke kan opstilles for magasinet på grund af manglende geologiske eller hydrologiske data, giver det ikke mening at anvende en numerisk model, da denne vil være behæftet med så stor usikkerhed, at metoden ikke kan retfærdiggøres i forhold til simple metoder. I disse sjældne tilfælde anbefales cirkelmetoden.

Kvalitetssikring af optegnet BNBO

Der er i forbindelse med beregning af BNBO behov for kvalitetssikring, hvilket bl.a. har til formål at sikre, at det optegnede BNBO areal kan administreres. Miljøstyrelsen har i den sammenhæng valgt, at der som udgangspunkt ikke optegnes BNBO med et forhold mellem længde og bredde (L/B-forhold), der i væsentlig grad overstiger 3.

Der skal foretages en visuel sikring af, at det enkelte BNBO har en rimelig udformning, retning og størrelse. Hvis det skønnes, at dette ikke er tilfældet er der behov for at gennemgå beregningsgrundlaget og eventuelt revurdere dette (jf. figur 3.1). I de tilfælde hvor L/B--forholdet overstiger 3, skal der være ekstra fokus på kvalitetssikringen af beregningsgrundlaget, herunder de valgte parameterværdier (grundvandsgradient, magasintykkelse, transmissivitet osv. Der er tale om en konkret vurdering ved hver enkelt indvindingsboring.

Usikkerhedsberegning af BNBO

Som en hjælp til den endelige udpegning anbefales det at vurdere usikkerheden på de enkelte parametre, der indgår i beregningen af BNBO.

Med en fast strømningstid på 1 år, er de væsentligste usikkerheder knyttet til fastsættelsen af magasinmægtighed, effektiv porøsitet, transmissivitet, gradient, strømningens retning og indvindingsmængde. For hver parameter anbefales det i en tabel at angive værdien for parameteren og den minimumværdi og den maksimumværdi, der er realistisk for parameteren. Tabellen kan danne grundlag for minimums- og maksimumsscenerier eller i særlige tilfælde stokastiske usikkerhedsberegninger.

På baggrund af usikkerhedstabellen skal usikkerheden for BNBO beskrives således, at der kan tages højde for usikkerheden ved udpegningen eller ved at supplere udpegningen med oplysninger om usikkerhedens størrelse. I nogle tilfælde, særligt hvor L/B-forholdet overstiger 3, kan det være nødvendigt at optegne udfaldene af minimums-/maksimums scenarier eller stokastiske kørsler. Baseret på udfaldsrummet optegnes det endelige BNBO, ud fra en faglig vurdering.

Genberegning af BNBO med L/B-forhold større end 3.

Såfremt genberegning med realistiske parameterværdier, på baggrund af vurderingen af usikkerheden på parametrene, fortsat ikke resulterer i et beregnet BNBO med et L/B-forhold, der er mindre end i størrelsesorden 3, beregnes BNBO med cirkelmetoden, hvor det cirkulære BNBO forskydes i opstrøms retning, parallelt med strømningens retning. Efter forskydningen sikres det, at periferien af det cirkulære BNBO ligger i stagnationspunktet for det tilsvarende BNBO, beregnet med enten en numerisk model eller med

AEM-metoden. Stagnationspunktet er det punkt på BNBO, der befinder sig mest nedstrøms boringen.

Det cirkulære BNBO skal dog ikke forskydes, hvis det er helt omsluttet af det tilsvarende BNBO, beregnet med enten en numerisk model eller med AEM-metoden.

Der kan beregnes et fælles BNBO for boringerne ved stort overlap mellem BNBO beregnet med cirkelmetoden, forudsat at boringerne indvinder fra det samme magasin. Alternativt beregnes et BNBO for hver boring ved anvendelse af en korrektion for, at der i virkeligheden foregår indvinding fra flere boringer tæt på hinanden, som beskrevet i kapitel 5 om AEM-metoden.

4. Cirkelmetoden

Ved beregning af BNBO med cirkelmetoden, beregnes BNBO som en radius med boringen i centrum. Dette ud fra relativt få parametre. Cirkelmetoden er illustreret på nedenstående figur 4.1.

Cirkelmetoden anvendes til beregning af BNBO i de tilfælde, hvor det beregnede BNBO ikke overlapper andre BNBO. Dette grundet begrænsninger ved metoden, hvor den konceptuelle model kun indeholder én boring og der derfor ikke kan gives retningslinjer for korrektion af de beregnede BNBO.

Størrelse af BNBO vurderes ud fra et simpelt hydrogeologisk princip, hvor der beregnes en fast radius i forhold til boringens indvindingsmængde¹⁰.

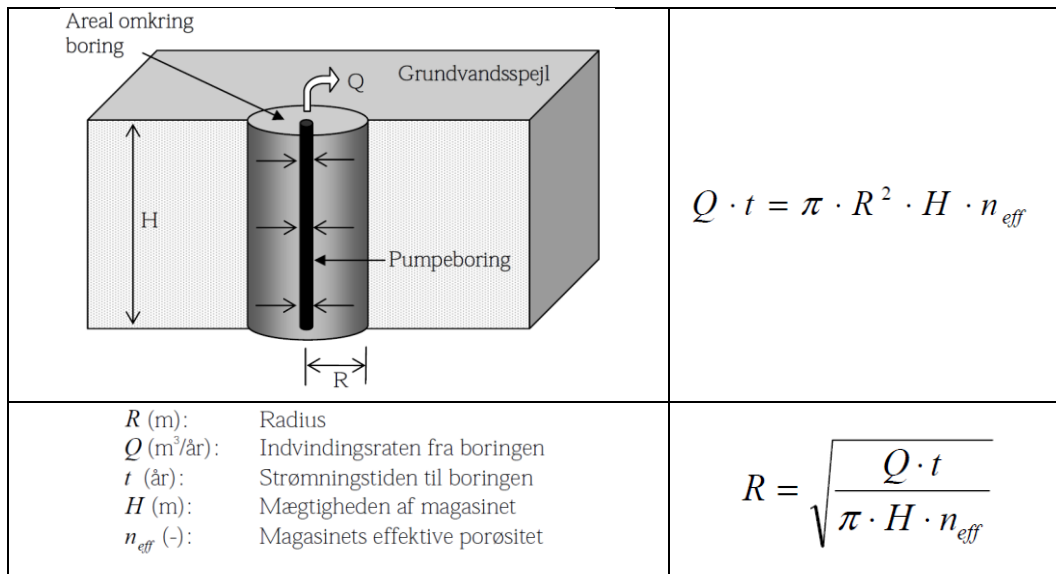
Beregningen er baseret på en volumetrisk balance mellem oppumpet vandmængde og mængden af vand i magasinet. Sammenhængen kan beskrives som følgende:

Volumen oppumpet i boring = Volumen i cylinder omkring boring.

Radius udtrykker den tid, det tager grundvandet at strømme hen til boringen ved den givne indvindingsmængde.

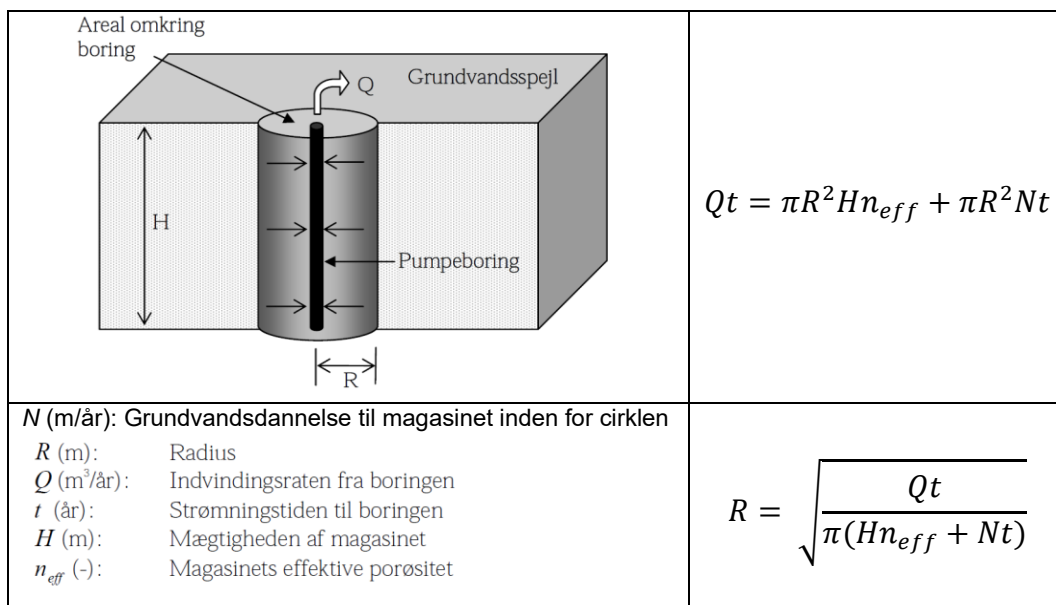
For cirkelmetoden gælder bl.a. følgende forudsætninger: Grundvandspotentialet står overalt i den samme højde; det er udelukkende indvindingen, der skaber grundvandsstrømningen i området; og grundvandsdannelsen er lig med nul. Metoden kan derfor ikke anvendes, hvis grundvandspejlet eller trykniveauet har en naturlig, regional gradient. Anvendes metoden i disse tilfælde, vil det betyde et for lille beskyttelsesområde opstrøms og for stort beskyttelsesområde nedstrøms boringen.

I beregningen forudsættes endvidere homogene og isotrope magasinforhold, konstant indvindingsrate og at boringen er filtersat igennem hele magasinet. Hvis disse forudsætninger ikke er opfyldt, kan beregningen stadig foretages, men usikkerheden øges.



Figur 4.1. Cirkelmetoden til beregning af BNBO.

Såfremt grundvandsdannelsen til magasinet vurderes væsentlig, kan en variant af cirkelmetoden anvendes, hvor grundvandsdannelsen indgår som parameter¹¹, se Figur 4.2.



Figur 4.2. Cirkelmetoden til beregning af BNBO med grundvandsdannelse til magasinet.

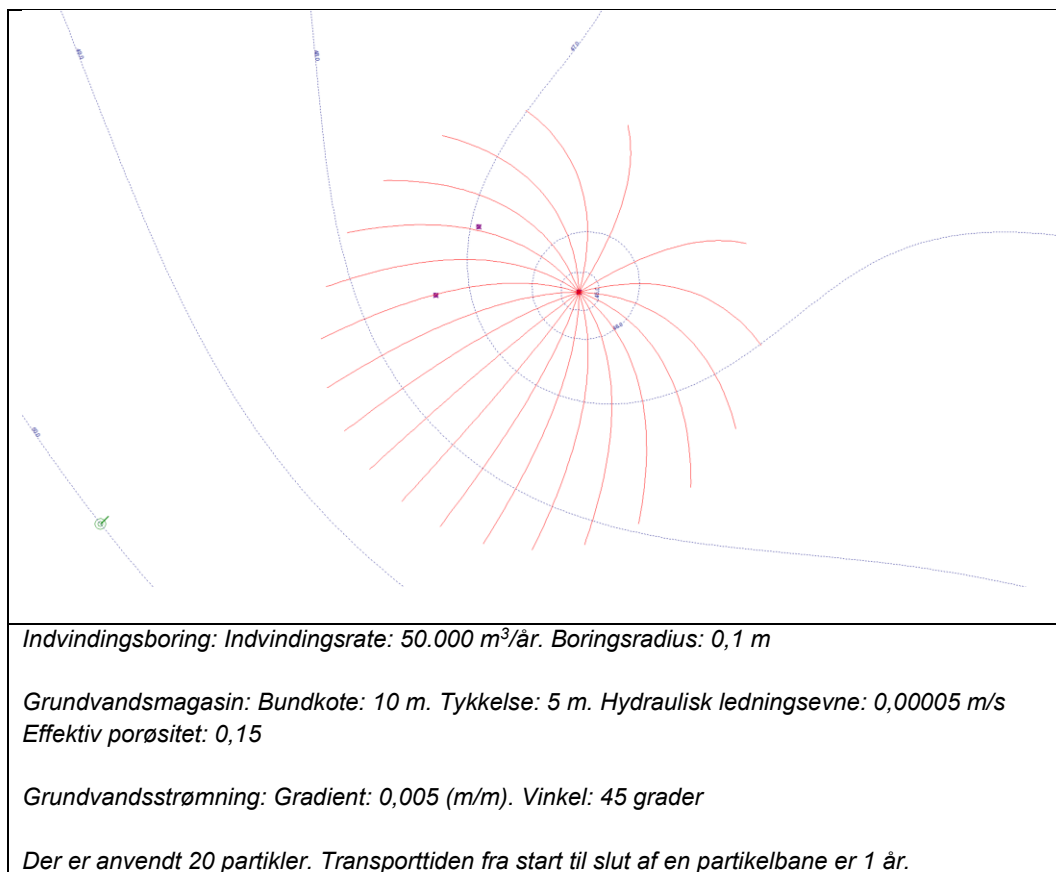
I kapitel 7 er parametrene, der indgår i beregningerne, uddybet, og der er angivet parameterværdier, der kan anvendes i beregningerne af BNBO, såfremt der ikke foreligger lokalspecifikke data.

5. AEM-metoden

Analytisk element metoden, AEM, giver mulighed for at opstille simple grundvandsmodeller, og er således et alternativ til numeriske grundvandsmodeller i de tilfælde, hvor de hydrogeologiske forhold ikke er komplekse.

Der er mulighed for at opstille AEM-modeller med flere lag, men i de tilfælde, hvor det er vigtigt at modellen indeholder flere lag, vil det ofte være relevant at anvende en numerisk grundvandsmodel i stedet for en AEM-model.

En helt simpel AEM-model til beregning af BNBO består af en indvindingsboring, der indvinder fra et grundvandsmagasin, der er uendeligt udbredt horisontalt. I grundvandsmagasinet foregår der en plan grundvandsstrømning. Grundvandsdannelsen til magasinet er nul. Figur 5.1. viser et eksempel på et BNBO beregnet med en helt simpel AEM-model.

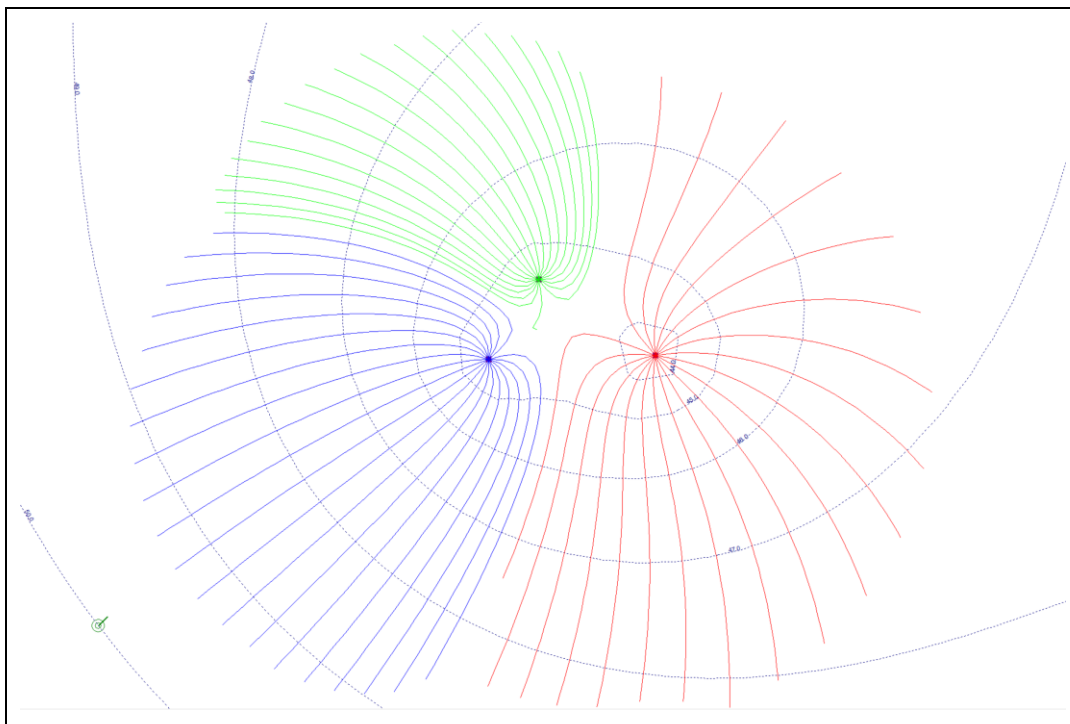


Figur 5.1. Eksempel på BNBO beregnet med en simpel AEM-model.

På kildepladser hvor indvindingsboringerne står så tæt, at BNBO ikke kan beregnes med en simpel AEM-model med kun én boring, som illustreret i Figur 5.1., skal der foretages en korrektion for, at der i virkeligheden foregår indvinding fra flere boringer tæt på hinanden. Dette gøres ved for hver indvindingsboring at anvende en fiktiv øget indvindingsmængde, der giver anledning til en sænkning i indvindingsboringen, der svarer til den resulterende

sænkning i indvindingsboringen som følge af den faktiske indvinding i indvindingsboringen og de faktiske indvindinger i de omkringliggende boringer. Sænkningerne beregnes med en analytisk løsning, idet det sikres, at forudsætningerne for den analytiske løsning, der bringes i anvendelse, f.eks. Hantush-Jacobs lækageløsning, svarer til den konceptuelle model.

En sådan korrektion undgås ved at tilføje de manglende indvindingsboringer i AEM-modellen. I figur 5.2 er vist et eksempel på BNBO beregnet med en AEM-model med 3 indvindingsboringer.



Figur 5.2. Eksempel på BNBO beregnet med en AEM-model med 3 indvindingsboringer.

For at kunne simulere de hydrogeologiske forhold, der har indflydelse på udbredelsen af BNBO, kan det være nødvendigt at opbygge, kalibrere og anvende en mere avanceret AEM-model med flere typer af analytiske elementer til beregning af BNBO som grundvandsdannelse, vandløb, søer, zoner med forskellig hydraulisk ledningsevne og impermeable barrierer.

I det tilfælde hvor det er vigtigt, at modellen indeholder flere typer af analytiske elementer, vil det ofte være relevant, at anvende en numerisk grundvandsmodel i stedet for en AEM-model til beregning af BNBO.

I kapitel 7 er parametrene, der indgår i beregningerne af AEM, uddybet, og der er angivet parameterværdier, der kan anvendes i beregningerne af BNBO, såfremt der ikke foreligger data fra lokaliteten.

6. Numerisk grundvandsmodel

Når de hydrogeologiske forhold er komplekse, skal en numerisk grundvandsmodel anvendes til beregning af BNBO. Numeriske grundvandsmodeller kan desuden anvendes til at beregne BNBO, når de hydrogeologiske forhold er simple i stedet for metode 1 og 2.

De anvendte numeriske modeller skal have sidelængder boringsnært på maksimalt 10 m. Det betyder, at regionale modeller (fx DK-modellen) er for grove til at kunne anvendes direkte, da diskretiseringen af disse modeller er 100 m eller mere. De regionale modeller kan dog bruges, hvis diskretiseringen forfines til 10 m eller mindre, i mindst hele det område som BNBO dækker, således at BNBO beregningen kan udføres med tilstrækkelig nøjagtighed.

For dobbeltporøse medier, som fx kalk, anvendes den effektive porøsitet for matrix + sprækker (tabel 1) til beregning af BNBO og ikke den effektive matrixporøsitet.

Ved partiel filtersætning er det relevant at opdele magasinlag i flere beregningslag, særligt i de tilfælde, hvor længden af indtagene, der indvindes fra, er væsentlig mindre end magasintykkelserne. Her skal det tilstræbes, at beregningslagene udformes, så midten af indtagene er placeret i midten af beregningslagene.

I reference 9, kapitel 8 findes en detaljeret diskussion af diskretisering i numeriske grundvandsmodeller og eksempler på forskellige diskretiseringsteknikker. Siden nævnte reference udkom, er der dog udviklet flere teknikker, der kan anvendes til lokal gridforfining boringsnært.

I kapitel 7 er parametrene, der indgår i beregningerne, uddybet, og der er angivet parameterverdier, der kan anvendes i beregningerne af BNBO, såfremt der ikke foreligger data fra lokaliteten.

Hvis forskelle mellem den geologiske lagfølge i den numeriske grundvandsmodel og den geologiske lagfølge i borerne, der skal beregnes BNBO for, vurderes at være af væsentlig betydning for resultatet af BNBO-beregningen, bør den hydrostratigrafiske model tolkes i en finere opløsning og herefter implementeres i beregningen af BNBO med den numeriske grundvandsmodel, som et led i gridforfiningen. Alternativt håndteres denne usikkerhed på den geologiske tolkning via scenarieberegninger, se afsnittet Usikkerhedsberegning af BNBO i Kapitel 3.

Ved partikelbaneberegningerne af BNBO skal der anvendes så mange partikler, som det er praktisk muligt, så det sikres, at BNBO bliver afgrænset så præcist som muligt.

Numeriske grundvandsmodeller til beregning af BNBO skal følge de til enhver tid gældende anvisninger for den nationale grundvandskortlægning samt ovenstående retningslinjer.

7. Beregningsparametre (valg af data)

7.1. Strømningstiden til boringen

Ved beregning af BNBO er beregningsparameteren "transporttid" af betydning for størrelsen af BNBO. Miljøstyrelsen har valgt at anvende en transporttid til beregning af BNBO på ét år. Dette uafhængig af indvindingsstilladelsens størrelse. Ved BNBO beregning efter Miljøstyrelsens vejledning fra 2007 blev transporttiden bestemt ud fra analysefrekvensen for organiske mikroforureninger. Dette tages der ikke højde for i denne beregningsprocedure.

7.2. Effektiv porøsitet

Effektiv porøsitet er defineret som andelen af porevolumen, hvor vand og andre væsker kan bevæge sig igennem en bjergart eller magasin. Effektiv porøsitet er altid mindre end total porøsitet, fordi isolerede porer i magasinet ikke bidrager til væskestrømningen. Analyse af forskellige typer af ukonsoliderede sedimenter^{5,6} viste, at den effektive porøsitet var tæt på den totale porøsitet. Det kan derfor med rimelig god tilnærmelse antages, at for kvartære sedimenter i Danmark er den effektive porøsitet svarende til den totale porøsitet.

Porøsiteten er afhængig af sedimentets kornstørrelse og sorteringsgrad således, at mere finkornede velsorterede sedimenter har højere porøsitet end grovkornede velsorterede sedimenter. Omvendt vil dårligt sorterede sedimenter have en lavere porøsitet, da finkornet materiale udfylder porerumene mellem de grovere korn. Lers egenskaber adskiller sig fra andre sedimenttyper, da ler har høj porøsitet, men meget ringe transportevne for væske, da porerne er små og næsten ikke forbundne.

Miljøstyrelsen anbefalede i 2007 gennemsnitsværdier for effektiv porøsitet¹, som blev opdateret i 2014⁷. De opdaterede værdier⁷ er vist i tabel 1 med ændrede værdier for forskellige typer af kalk på baggrund af data fra Geovejledning 8⁸.

I forbindelse med BNBO-beregningen anbefales det at vurdere kornstørrelse og sorteringsgrad af magasinet ud fra den geologiske beskrivelse for de indvindingsboringer, der indgår i BNBO-beregningen. Eventuelt kan geologiske beskrivelser fra andre boringer i nærheden inddrages. Disse beskrivelser findes i Jupiter-databasen.

Opsprækkede magasiner

I dobbeltporøse magasiner, som eksempelvis opsprækket kalk er effektiv porøsitet en blanding af den primære (matrixen) og den sekundære (sprække) porøsitet^{8,9}. Indenfor BNBO sker den primære strømning gennem sprækkesystemet med et mindre bidrag til strømningen fra matrix. Sprækkesystemet har lille effektiv porøsitet, og der bør tages højde for dette i BNBO-beregningen. Der anvendes en effektiv porøsitet lig med 10 % for et opsprækket kalkmagasin (jf. Tabel 1).

Hvis det er praktisk muligt kan strømningen i matrix og sprækker beregnes adskilt i en dobbeltporøs model. Hvis en dobbeltporøs model anvendes, bør adskilte porøsitetsværdier for matrix og sprækker bruges (tabel 1). Værdierne i tabel 1 er vejledende. Hvis målinger af porøsitet fra magasinet er til rådighed, bør disse anvendes i stedet for værdierne i tabellen. Tilsvarende hvis data er til rådighed fra stoftransportforsøg eller tracerforsøg, er det en mulighed at anvende disse data til at kalibrere de effektive porøsiteter i en dobbeltporøs model.

Tabel 1^{7,8}. Delvist fra Tabel 1⁷, Figur 16⁸ og Tabel 19⁴.

Geologisk lag	Specifik ydelse* (%)	Effektiv porøsitet (%)	Anbefalet effektiv porøsitet (%)
Ler	1 - 18	30 - 60	40
Moræneler	1 - 20	10 - 30	25
Silt (morænesilt)	5 - 20	35 - 50	40
Sand	10 - 30	25 - 40	30
Grus	15 - 30	20 - 35	27
Sand og grus (usortet)	10 - 30	15 - 35	25
København kalk**	0.5 - 5	10 - 25	18
Bryozo kalk**	0.5 - 5	35 - 43	38
Skrivekridt**	0.5 - 5	35 - 50	45
Kalk** (sprækkeporøsitet)	-	0,1 - 1	0.5
Kalk (matrix + sprækker)	0.1 - 10	0,1 - 10	10
Sandsten	5 - 15	5 - 30	15

*Specifik ydelse er defineret som den del af porevolumen, som kan drænes af tyngdekraft.

** Anvendes kun ved dobbeltporøse modeller.

7.3. Indvindingsmængde

Indvindingsmængden sættes ud fra indvindingstilladelsen. Ved flere boringer under samme indvindingstilladelse, bør det overvejes, hvorledes indvindingsmængden fordeles ud på boringerne. Dette på en måde, der er så virkelignær og robust som muligt. BNBO vil ofte beregnes i forbindelse med beregning af et indvindingsopland. Her vil der som udgangspunkt anvendes samme indvindingsfordeling ved beregning af BNBO, som ved beregning af indvindingsoplandet. Ved fastsættelse af indvindingsmængden, uanset om BNBO beregnes separat eller i forbindelse med et indvindingsopland, kan

der indhentes oplysninger om indvindingsfordelingen fra Jupiter, kommunen eller vandforsyningen. For at få en så robust indvindingsfordeling som muligt, der holder sig inden for gældende indvindingstilladelse, kan der ses på indvindingsfordelingen fra den oppumpede vandmængde over en årrække, og laves et gennemsnit heraf. I visse tilfælde kan der vælges en ligelig indvindingsfordeling vandforsyningsboringer imellem.

7.4. Magasintykkelse

7.4.1. Cirkelmetoden

Magasintykkelsen fastlægges som tykkelsen af det vandførende lag indtaget indvinder fra. Se afsnit 7.5. om bestemmelse af magasintykkelse for boringsindtag.

7.4.2. AEM-metoden

Indvindes der fra flere hydraulisk adskilte indtag i en boring, skal der beregnes et særskilt BNBO for hvert af indtagene i boringen. Det vil sige, at der skal opstilles og anvendes en særskilt AEM-model for hvert af de hydraulisk adskilte indtag, der indvindes fra.

For en AEM-model med indvinding fra et enkelt indtag, fastlægges magasintykkelsen som tykkelsen af det vandførende lag, indtaget indvinder fra. Se nedenstående afsnit om bestemmelse af magasintykkelse for boringsindtag.

For en AEM-model med simultan indvinding fra flere indtag i det samme magasin, fastlægges en repræsentativ værdi for magasintykkelsen ud fra den hydrostratigrafiske model, der er opstillet for magasinet.

7.4.3. Numerisk grundvandsmodel

Lagtykkelserne, herunder magasintykkelserne, der er implementeret i den numeriske model, skal være identiske med lagtykkelserne i den hydrostratigrafiske model, der er opstillet for de hydrostratigrafiske enheder.

7.5. Magasintykkelse for boringsindtag

Nedenstående betragtninger bruges udelukkende i forbindelse med AEM-metoden og cirkelmetoden.

Magasintykkelser for boringsindtag bestemmes med udgangspunkt i boringsoplysningerne i Jupiterdatabasen, herunder evt. borehulslogs og vandkemi. Summen af de vandmættede tykkelser af lagene med magasinegenskaber, i hvilke boringsindtaget er placeret, udgør den samlede magasintykkelse.

Ved bestemmelse af magasinets tykkelse identificeres først de eller det lag med magasinegenskaber, i hvilke(t) boringsindtaget er placeret.

Herefter identificeres om magasinet, som indtaget er placeret i, er spændt eller frit. Et spændt magasin er overlejret af en akvitard eller en aquiclude og underlejret af en akvitard eller en aquiclude og trykniveauet i magasinet står i et højere niveau end niveauet for toppen af magasinet. Toppen af et

frit magasin udgøres af et grundvandspejl, mens bunden af et frit magasin udgøres af en akvitard eller en aquiclude.

For et spændt magasin bestemmes magasintykkelsen, som forskellen mellem bundkoten for det overliggende lag (akvitard eller aquiclude) og topkoten for det underliggende lag (akvitard eller aquiclude).

For et frit magasin bestemmes magasintykkelsen, som forskellen mellem koten for grundvandsspejlet og topkoten for det underliggende lag (akvitard eller aquiclude).

De geologiske forhold er ikke altid simple i forhold til at bestemme magasinets tykkelse. Er der eksempelvis et tyndt lerlag (eller evt. flere tynde lerlag), der adskiller to sandlag, vurderes det, om dette lerlag udgør toppen af magasinet, eller om det overliggende sandlag også er en del af magasinet. Ofte er borerne afsluttet i det sandlag, hvorfra der indvindes, og bunden af sandlaget og dermed bunden af magasinet kendes derfor ikke. Også omkring kalkboringer er der forhold, som gør det vanskeligt at bestemme magasinets tykkelse.

Det er således nødvendigt grundigt at vurdere de geologiske lag i en boring og derfra træffe nogle valg. I hvert tilfælde er der tale om en konkret vurdering, men for at sikre en vis ensartethed, er der opstillet en række rettesnore for bestemmelse af magasintykkelsen, som der skal tages udgangspunkt i:

- Hvis magasinet ikke er gennemboret, bestemmes magasinbunden ud fra en anden boring på kildepladsen eller i nærområdet, eller den angives som bund af boring.
- Hvis et lerlag, der adskiller to vandførende lag, er mindre end 3 m tykt, vil der ofte være hydraulisk kontakt mellem de vandførende lag, og magasintop vil derfor som regel kunne bestemmes enten som top af det øverste magasin eller som frit vandspejl.
- Hvis boringen er filtersat i et kalkmagasin bestemmes magasinbund som filterbund, hvis denne ligger dybere end 10 meter nede i kalken, ellers angives magasinbunden til 10 meter nede i kalken, da det som udgangspunkt er de øverste 10 m af kalken, der er opsprækket, og kan betragtes som et magasin.
- Hvis der er tale om en uforet kalkboring med forerør mindre end 5 meter nede i kalken, sættes magasinbund til 10 meter nede i kalken. Der tages ikke hensyn til at tykkelsen af den uforede del af boringen, da det er de øverste 10 meter, der vurderes mest opsprækket.
- Hvis der er tale om en uforet kalkboring med forerør dybere end 5 meter nede i kalken, sættes magasinbund til 10 meter under forerør.
- Hvis frit vandspejl i kalkmagasinet, sættes magasinbund til 10 meter under vandspejlet, og magasintop til vandspejl.

- Hvis spændt kalkmagasin sættes magasintop ved toppen af kalken eller ved top af eventuel overliggende sandlag, der vurderes i hydraulisk kontakt med kalken.
- Der anvendes seneste målte rovandstand i indtaget til bestemmelse af magasintykkelsen. Er der ikke målt rovandstand i indtaget, bestemmes rovandstanden i indtaget ud fra rovandstanden målt i en anden boring på kildepladsen i samme magasin.
- Magasintykkelsen kan reduceres i forhold til ovenstående rettesnore, hvis det kan godtgøres ud fra tolkede borehulslogs eller andre data. Det kunne f.eks. være ud fra oplysninger fra flowlogs i form af tykkelser af indstrømningsintervaller/sprækker.

7.6. Hydraulisk konduktivitet

7.6.1. Cirkelmetoden

Den hydrauliske konduktivitet indgår ikke som en parameter for cirkelmetoden.

7.6.2. AEM-metoden

For en AEM-model med indvinding fra et enkelt indtag, beregnes den hydrauliske konduktivitet som forholdet mellem transmissiviteten for magasinet og magasintykkelsen, idet transmissiviteten er defineret som produktet af magasintykkelsen og den hydrauliske konduktivitet. Se nedenstående afsnit om fastlæggelse af transmissiviteten for et magasin. Såfremt transmissiviteten for magasinet ikke kan beregnes, fastlægges en repræsentativ værdi for den hydrauliske konduktivitet ved tabelopslag i en lærebog om hydrogeologi, og der refereres til den pågældende tabel i dokumentationen for det beregnede BNBO.

For en AEM-model med simultan indvinding fra flere indtag i det samme magasin, fastlægges en repræsentativ værdi for den hydrauliske konduktivitet ved at kalibrere AEM-modellen mod observerede trykniveauer i magasinet.

7.6.3. Numerisk grundvandsmodel

For en numerisk model fastlægges repræsentative værdier for de hydrauliske ledningsevner af magasiner og akvitarder ved at kalibrere den numeriske grundvandsmodel mod observerede trykniveauer i magasinerne og observerede vandføringer i vandløbene.

7.7. Transmissivitet

Transmissiviteter for enkeltboringer bestemmes med udgangspunkt i boringsoplysningerne i Jupiterdatabasen, med mindre transmissiviteten for et magasin er bestemt ved et prøvepumpningsforsøg.

Såfremt transmissiviteten for et magasin er bestemt ved et prøvepumpningsforsøg anvendes denne værdi.

Såfremt der ikke er udført prøvepumpningsforsøg, bestemmes transmissivitet ud fra den specifikke kapacitet, der er forholdet mellem boringens ydelse og sænkningen af trykniveauet i boringen, der blev registreret ved renpumpningen af boringen i forbindelse med etableringen af boringen.

Transmissiviteten bestemmes ud fra den specifikke kapacitet (Q/s_w) ved anvendelse af Jacobs formel:

$$T = \frac{0,183Q}{s_w} \log \frac{135Tt}{r_w^2 S}$$

- T = transmissivitet (m^2/s)
- Q = boringens ydelse (m^3/s)
- s_w = sænkning (m)
- r_w = filterradius (m)
- S = magasintal
- t = tid (min)

Som det fremgår af formlen står T på begge sider af lighedstegnet, hvorfor T skal bestemmes iterativt. Formlen anvendes for både spændte og frie magasiner.

I nogle tilfælde er der hverken opgivet oplysninger om boringens ydelse, vandspejls-sænkning eller pumpetid. I disse tilfælde kan transmissiviteten vurderes ud fra nærliggende boringer med samme geologi.

For at bestemme transmissiviteten og dermed den hydrauliske konduktivitet, skal der således anvendes en række data. Der er tale om:

Filterradius: I tilfælde, hvor filterradius ikke fremgår af Jupiterdatabasen eller kan bestemmes indirekte ud fra forerørsdiameter i Jupiterdatabasen, anvendes: $r_w = 75$ mm.

Magasintal: I de tilfælde, hvor magasintallet ikke fremgår af Jupiterdatabasen, anvendes standardværdier for frit og spændt magasin på henholdsvis 0,1 og 0,0004.

Boringens ydelse: Det er en forudsætning for at bestemme T ud fra den specifikke kapacitet, at boringens ydelse er målt.

Sænkningen: Det er en forudsætning for at bestemme T ud fra den specifikke kapacitet, at sænkningen i boringen er målt.

Tiden: Tiden er den tid, der er renpumpet eller prøvepumpet. I de tilfælde, hvor pumpetiden ikke fremgår af Jupiterdatabasen, anvendes: 1 time.

Såfremt der er registreret tredelte renpumpninger, anvendes den specifikke kapacitet for den første af de tre renpumpninger.

7.8. Gradient og strømningsretning

Cirkelmetoden

Gradienten og strømningsretningen indgår ikke som parametre for cirkelmetoden. Cirkelmetoden skal derfor ikke anvendes, hvis grundvandspejlet eller trykniveauet har en naturlig, regional gradient.

7.8.1. AEM-metoden

For en AEM-model, hvor gradienten og strømningsretningen indgår som parametre i beregningerne, fastlægges gradienten og strømningsretningen, ud fra et potentialekort for det specifikke magasin, modellen repræsenterer, det vil sige et magasinspecifikt potentialekort. Se nedenstående afsnit om anvendelse af et magasinspecifikt potentialekort til fastlæggelse af gradient og strømningsretning.

For en AEM-model med simultan indvinding fra flere indtag i det samme magasin, beregnes et repræsentativt magasinspecifikt potentialekort ved at kalibrere AEM-modellen mod observerede trykniveauer i magasinet og mod et magasinspecifikt potentialekort fremstillet ved interpolation af de observerede trykniveauer i magasinet.

7.9. Magasinspecifikt potentialekort

Den regionale, naturlige gradient for grundvandspotentialiet i magasinet bestemmes som forholdet mellem det målte vertikale fald i grundvandspotentialiet over en målt horisontal afstand og selve den målte horisontale afstand. Afstanden mellem de målte grundvandspotentialer skal måles langs en ret linje, der skærer potentialekurverne i en ret vinkel.

Ud fra orienteringen af den rette linje, der skærer potentialekurverne i en ret vinkel og retningen af grundvandsstrømningen, fastsættes strømningsretningen, det vil sige kompasretningen for strømningen, i grader med uret i forhold til nord.

Gradienten for trykniveauet eller grundvandsspejlet i magasinet bestemmes som udgangspunkt ud fra nyeste magasinspecifikke potentialekort, som er baseret på pejlinger af grundvandstanden i magasinet, hvor boringsindtaget er beliggende.

Gradienten vurderes fra boringsindtaget og opstrøms. Gradienten vurderes ikke alene inde omkring boringen, men afhængigt af potentialekurvernes tæthed, over en afstand af typisk 300-1000 m.

8. Optegning af BNBO

Forud for udpegning af BNBO skal nedenstående forhold tages i betragtning uafhængigt af beregningsmetode.

Miljøstyrelsen har valgt, at der som udgangspunkt ikke optegnes BNBO med et forhold mellem længde og bredde (L/B-forhold), der i væsentlig grad overstiger 3, jf. afsnittene om kvalitetssikring af optegnet BNBO og usikkerhedsberegning af BNBO i kapitel 3.

Der afgrænses ét BNBO pr. boring og ikke en samlet polygon for en hel kildeplads. For boringer, med flere stammer filtersat i forskellige hydraulisk afskilte magasiner, afgrænses ét BNBO pr. indtag. For boringer med to stammer filtersat i samme magasin, beregnes ét samlet BNBO. For boringer med flere filtre på samme stamme beregnet ét samlet BNBO. I det særlige tilfælde, hvor BNBO er beregnet med cirkelmetoden, som følge af, at L/B-forholdet er større end 3, kan der optegnes et fælles BNBO for boringerne ved stort overlap mellem BNBO, forudsat at boringerne indvinder fra det samme magasin.

BNBO afgrænses ikke efter brugs- og matrikelgrænser eller andre administrative skel. Ved kommunernes efterfølgende målrettede grundvandsbeskyttelse, kan den enkelte kommune administrativt vurdere, hvordan drikkevandsressourcen sikres bedst muligt samtidig med, at der laves administrative fornuftige aftaler med de pågældende lodsejere.

BNBO skal inden endelig afgrænsning udglattes, da BNBO ikke skal fremstå kantet som følge af eksempelvis manuelle punkter sat i GIS eller punkter forbundet direkte mellem partikelendepunkter, idet det bemærkes, at BNBO vil blive anvendt på matrikelniveau. Et BNBO må endvidere ikke strække sig uden for et udpeget indvindingsopland. For BNBO beregnet på baggrund af numeriske modeller, skal der være en sikkerhedsmargin på BNBO svarende til størrelsen af modeldiskretiseringen. Dvs. med en cellediskretisering på 10x10 m vil der lægges en usikkerhedsmargin på 10 m rundt om hele BNBO. Denne usikkerhedsmargin placeres fra grænsen af partikelbanernes placering eller selve partiklernes placering projiceret op på terrænoverfladen.

9. Referencer

1. Vejledning fra Miljøstyrelsen Nr. 2, 2007.
2. GEUS Notat nr.: 06-VA-19-01., 2019. Side 1 – 19.
3. Geovejledning 2, 2018. Opstilling af geologiske modeller til grundvandsmodellering.
4. Geovejledning 2017/1. Hydrologisk geovejledning. God praksis i hydrologisk modellering.
5. Todd, K.T., Mays, L.W. 2005. Groundwater Hydrology Third Edition P. 138.
6. Rawls, W.J., D. L. Brakensiek, and N. Miller 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. J. Hydraulic Div., ASCE, v.109, No.1 pp 62-70.
7. NST, 2014. Notat – Præcisering af anbefalinger i Geovejledning 2 mht. afgrænsning af indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande. Bilag 3.
8. Kortlægning af kalkmagasiner. Geovejledning 8, 2011.
9. Gordon, M., 1986. Dependence of effective porosity on fracture continuity in fractured media. Ground Water, v. 24, nr. 4, 446-452.
10. GEUS, 2005. Håndbog i grundvandsmodellering. Torben Obel Sonnenborg & Hans Jørgen Henriksen (eds). DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSESRAPPORT 2005/80.
11. USEPA, 1993. Guidelines for delineation of wellhead protection areas. Technical Report EPA/440/5-93-001, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Office of Ground Water Protection, Washington, DC, pp. 4-6 - 4-7.
12. Kraemer, S. R. & Haitjema, H. M., 2018. Working with WhAEM; Demonstration of Capture Zone Delineation for a City Wellfield in a Valley Fill Glacial Outwash Aquifer for Wellhead Protection. EPA/600/B-18/089. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC, pp. 19-20.



Miljøstyrelsen
Tolderundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk