

Forståelse af grundvandsdannelse og strømningsforhold i vandløbsnære oplande med vandindvinding

Rapportering til Partnerskabet for
Bæredygtig Vandforsyning

Sachin Karan & Bertel Nilsson

Forståelse af grundvandsdannelse og strømningsforhold i vandløbsnære oplande med vandindvinding

Rapportering til Partnerskabet for
Bæredygtig Vandforsyning

Sachin Karan & Bertel Nilsson

Indhold

Sammendrag	5
1. Baggrund for Partnerskabsprojektet	7
1.1 Formål	7
2. Konceptuel forståelse af strømningsforholdene i vandløbsnære arealer i forbindelse med vandindvinding	9
2.1 Vandudveksling mellem grundvand og vandløb.....	9
2.2 Strømningsforhold i ådalen	10
2.3 Drænastrømning i grundvandsdannende oplande	11
2.4 Delkonklusioner	12
3. Strømningsmønstre og grundvandsbeskyttelse i vandløbsnære arealer med grundvands-indvinding	14
3.1 Konceptuel forståelsesmodel ved vandindvinding	14
3.2 Indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande.....	14
3.3 Ændringer i grundvand- og vandløbsudveksling ifm. grundvandsindvinding.....	16
3.4 Kortlægning af strømningsveje med stabile iltisotop målinger	17
3.5 Delkonklusion.....	18
4. Modellering af grundvandsudvekslingen mellem grundvand og vandløb	19
4.1 Simulering af strømningsveje i forhold til grundvand-vandløbsudveksling	19
4.2 Partikelbane simuleringer	20
4.3 Simulering af påvirkningen fra variationer i vandløbsnær grundvandsindvinding.....	23
4.4 Modelusikkerhed i den vandløbsnære zone med statens grundvandskortlægningsmodeller (geologi og hydrologi) – hvad mangler af data ?	24
4.5 Delkonklusion.....	25
5. Analyse af feltundersøgelser ved to Fors A/S kildepladser	26
5.1 Knabstrup Enge kildeplads	27
5.1.1 Anvendte metoder	27
5.1.2 Vurdering af strømningsforhold i vandløbsnære arealer med og uden vandindvinding.....	27
5.1.3 Opsummering (Knabstrup Enge).....	31
5.2 Ørbæk kildepladsen	32
5.2.1 Anvendte metoder	32
5.2.2 Vurdering af strømningsforhold i det vandløbsnære areal med og uden indvinding.....	34
5.2.3 Delkonklusion (Ørbæk)	37
5.3 Generelle overvejelser ved opstilling af monitoringsprogram	39

6.	Perspektivering	40
7.	Konklusioner og anbefalinger	42
8.	Referencer	45
Bilag 1: Knabstrup Enge - Beskrivelse af geologiske lag		49

Sammendrag

Nærværende rapport er udarbejdet af GEUS for Partnerskabet for Bæredygtig Vandforsyning og har til formål at opnå en bedre forståelse af grundvandsdannelse og strømningsforhold i vandløbsnære arealer med vandindvinding. Fokus er på, hvordan grundvandet bevæger sig i disse områder, og hvordan man bedst kan beskytte grundvandsressourcerne mod forurening og overudnyttelse. Projektet er særligt relevant for at kunne prioritere indsatsområder, hvor der skal iværksættes tiltag for at beskytte drikkevandsressourcerne, samtidig med at der tages hensyn til økologiske forhold i vandløb og ådale.

Rapporten beskriver, hvordan vandudvekslingen mellem grundvand og overfladevand sker i de vandløbsnære områder. Her spiller både geologiske forhold, strømningsmønstre og menneskelig påvirkning en afgørende rolle. En vigtig del af rapporten er en konceptuel forståelse af, hvordan vand strømmer gennem landskabet, herunder de fire primære strømningsveje, der er identificeret i ådale. Disse inkluderer blandt andet diffus strømning gennem jorden, afstrømning via drænen og direkte udveksling mellem grundvand og vandløb. Særligt drænafstrømningen har stor betydning for transporten af forurenende stoffer som næringsstoffer og pesticider, da den kan føre forureningen hurtigt fra landbrugsområder til både vandløb og grundvandsmagasiner.

For bedre at forstå, hvordan grundvandsindvinding påvirker disse strømningsforhold, er der foretaget feltundersøgelser ved to Fors A/S kildepladser, Knabstrup Enge og Ørbæk. Disse undersøgelser har blandt andet inkluderet målinger af grundvandsstand, vandføring i vandløb og stabile iltisotoper, som gør det muligt at kortlægge vandets oprindelse og bevægelse. Resultaterne viser, at der generelt fortsat er en opadrettet strømning af grundvand mod vandløbene, også når der pumpes vand op, men i en reduceret mængde. På Knabstrup Enges kildeplads er det eksempelvis observeret, at der stadig sker en tilførsel af grundvand til Tuse Å, men oppumpningen skaber ændringer i gradientforholdene, hvilket kan have betydning for sammensætningen af det vand, der når frem til vandløbet. Det er dog ikke fuldt belyst, hvordan dette potentielt påvirker vandkemien og de økologiske forhold i det vandløbsnære område.

En vigtig del af rapporten omhandler modellering af grundvandsstrømme og deres påvirkning af vandløb. Ved hjælp af hydrologiske modeller er det muligt at simulere effekterne af grundvandsindvinding og forudsige, hvordan ændringer i oppumpning påvirker vandløb, drænsystemer og grundvandsmagasiner. Dog er der en række usikkerheder forbundet med disse modeller, blandt andet fordi de bygger på forenkede antagelser om geologiske forhold og ikke altid tager højde for den store variation i de vandførende lag. Eksempelvis fremhæves, at anisotropi i jordlagene og variationer i magasintykkelse blandt andet spiller en stor rolle for modellernes nøjagtighed i forhold til at beregne indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande. Desuden kan tidlige variationer i nedbør og vandindvinding føre til, at modellerne ikke altid giver et korrekt billede af, hvordan vandet bevæger sig i praksis.

Rapporten konkluderer, at det er afgørende at kombinere feltundersøgelser og modelberegninger for at opnå en mere præcis forståelse af grundvandsstrømningsforholdene i vandløbsnære områder. Lokale hydrauliske gradienter bør kortlægges grundigt, da de har stor

betydning for, hvor vandet strømmer, og hvilke arealer der bør prioriteres i forhold til grundvandsbeskyttelse. Hydrologiske modeller bør forbedres ved at inkludere mere detaljerede geologiske data og tage højde for lokale forhold, især i områder med høj geologisk heterogenitet. Endelig understreges det, at bedre monitorering af vandudveksling mellem grundvand og vandløb er nødvendig for at sikre en bæredygtig forvaltning af grundvandsressourcerne.

1. Baggrund for Partnerskabsprojektet

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med projektet ” Forståelse af grundvandsdannelse og strømningsforhold i vandløbsnære oplande med vandindvinding”. Opgaven er udført af GEUS for Partnerskabet for Bæredygtig Vandforsyning i perioden 1. juli 2023 til 30. September 2024.

Myndigheder skal i samarbejde med vandværker prioritere arealer, der skal udtages til etablering af virkemidler for at minimere transport af diverse uønskede stoffer fra højbundslande til vandløb og grundvandsmagasiner, hvorfra vi henter vores drikkevand (Grøn Trepartsaftale, 2024). Når arealer udvælges, tages der udgangspunkt i modelberegnete indvindingsoplande og indsatsområder for de konkrete kildepladser. For de mange vandforsyningsboringer der ligger i ådale, er der behov for at kunne vurdere i hvilket omfang ådalen og dens omgivelser, herunder også selve vandløbet, faktisk bidrager med grundvandsdannelse til kildepladsen, for bedre at kunne tage beslutning om implementering af grundvandsbeskyttelse og konkrete indsatser.

Partnerskaber for Bæredygtig Vandforsyning er et samarbejde mellem Region Sjælland, Danske Vandværker, Dansk Økojord A/S, SEGES, Danmarks Naturfredningsforening, DANVA, VKST landbrugsrådgivning, GEUS, Miljøstyrelsen, Lejre Kommune, Køge Kommune, FORS og Urland. Partnerskabet har bedt GEUS om at lave en vidensopsamling med fokus på en forbedret forståelse af grundvandsdannelse og strømningsveje i vandløbsnære oplande (benævnt Partnerskabsprojektet). Som udgangspunkt belyses afstrømningsforholdene i den vandløbsnære zone fra indvindingsoplandets afgrænsning til vandløbet med det formål at identificere arealer med landbrugsdrift og lavbundslande, der kan udtages til en multifunktionel opfyldelse af diverse dagsordener som f.eks. grundvandsbeskyttelse (primært imod pesticider), herunder lavbundslande i selve ådalen til reduktion af klimagas emission, øgning af biodiversiteten, næringsstoffjernelse og forsinkelse af afstrømning til vandløb.

1.1 Formål

Det overordnede formål med Partnerskabsprojektet, som potentielt kan hjælpe med at opnå en konceptuel forståelse af, hvordan grundvand strømmer i vandløbsnære arealer med vandindvinding, hvor der opnås mest grundvandsbeskyttelse ”for pengene”. Det er også væsentligt at kunne give en indikation af hvilke arealer, der ikke har behov for beskyttelse ved vandløbsnære kildepladser. I kapitel 2-4 laves en vidensopsamling, der kan sammenstille den konceptuelle forståelse af grundvandets strømningsveje, med værktøjer, metoder og processer med henblik på at bidrage til den langsigtede indsats til beskyttelse, anvendelse og forvaltning af grundvandsressourcen i oplande til vandværkernes kildepladser i Region Sjælland.

I nærværende projekt fokuseres der på den vandløbsnære hydrologis indflydelse på grundvandsdannelse og strømningsforhold i vandløbsnære oplande med grundvandsindvinding. De nuværende modellers repræsentativitet til at estimere, om og i hvilket omfang, der opnås

en grundvandsbeskyttelse til gavn for kildepladsen ved at udtage arealer i vandløbsnære arealer vurderes i forhold til den etablerede konceptuelle forståelsesmodel. I kapitel 5 vises resultaterne fra to feltstudier ved Fors A/S kildeplader på vandløbsnære arealer til koncept afprøvning. Der skal i forlængelse heraf udfærdiges generelle anbefalinger af hvilke datatyper, prøvetagningssteder, og hvilke relevante monitoringsstudier, der er behov for, for at estimere de vandløbsnære strømningsforhold (afsnit 5.3). Der er foretaget en projektafgrænsning således at der er fokus på belysning af de strømningsmæssige forhold og kvantitative påvirkninger fra vandindvinding i de vandløbsnære arealer.

2. Konceptuel forståelse af strømningsforholdene i vandløbsnære arealer i forbindelse med vandindvinding

2.1 Vandudveksling mellem grundvand og vandløb

Teoretiske principper for grundvandets strømningsveje i et tværsnit igennem et vandløbsopland er beskrevet af Toth (1963), hvor det vises, at geologisk heterogenitet er en komplicerende faktor i beskrivelsen af vandets strømning fra grundvand til overfladevand. Udvekslingen af grundvand og overfladevand (vandløb, søer, vådområder og kystvande), er ligeledes veldokumenteret i danske undersøgelser (Nilsson med flere, 2009; Karan med flere, 2013; Sebok med flere, 2018; Duque med flere, 2023). Modelberegninger med den Nationale Hydrologiske Model (DK-modellen) viser, at de fleste vandløb i Danmark er i kontakt med grundvand (85%) uanset om oplandet er sandet eller leret (Henriksen med flere 2003; Sechu med flere, 2022). Vandløbsstrækninger kan både modtage grundvand ved opadrettede hydrauliske gradientforhold og på kortere vandløbsstrækninger tage vand til grundvandszonen ved nedadrettede gradientforhold, så der sker en opblanding af vandløbsvand med det øvre grundvand (Winter med flere, 1998). Påvirkning fra klimatiske ekstremhændelser ved oversvømmelse og tørke har ligeledes en væsentlig indflydelse på kontakten mellem grundvand og overfladevand (Bernard-Jannin med flere, 2017; Malama med flere, 2021; Ranalli med flere, 2010).

Reduktion i vandføringen ved kildepladser som følge af grundvandsindvinding benævnes "streamflow depletion" i litteraturen (Barlow og Leake 2012; Zipper med flere 2024). Det har vist sig vanskeligt at kvantificere den del af vandløbshydrografen, der alene kan tilskrives påvirkning fra grundvandsindvinding, da klimatiske påvirkninger og menneskelige aktiviteter i vandløbsoplandet i mindst lige så høj grad påvirker vandføringen. Modelstudier viser, at der skal benyttes en fysisk baseret integreret numerisk grundvand-overfladevandsmodel til at beregne, hvor stor andel af vandføringsreduktionen der kan tilskrives påvirkning fra grundvandsindvinding i det vandløbsnære område (Killian med flere, 2019). Modelstudier af grundvand/vandløbsudveksling i midtsjællandske vandløbsoplande (Suså, Køge Å med flere) i 1970-erne viste betydelige tab af vandløbsvand til grundvandet ved grundvandsindvinding i tørkeramte somre (Refsgaard og Hansen, 1982).

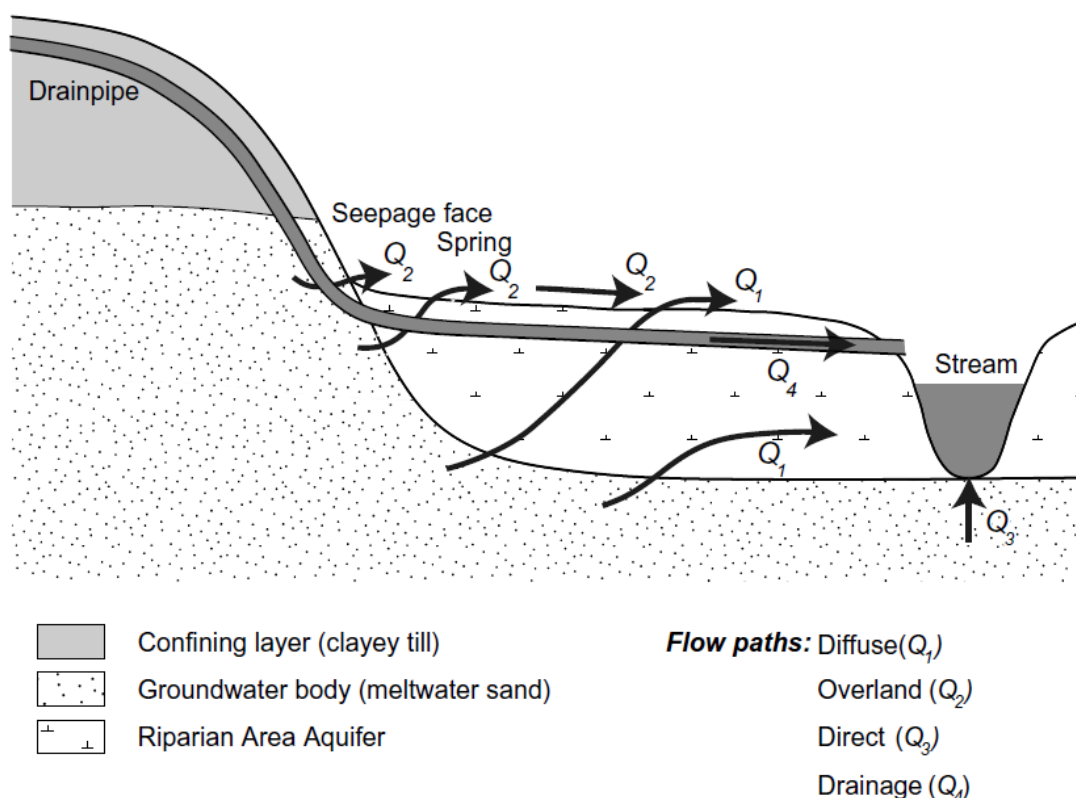
Et andet dansk studie har undersøgt udvekslingen mellem vandløb og kalkgrundvandsmagasiner i Himmerland. De vandløbsstrækninger, hvor kalkoverfladen lå mindre end 3m fra vandløbsbunden, indikerede udvikling af opløsningsfænomener (karstdannelser) i toppen af kalkmagasinerne, hvilket komplicerer strømningsforholdene betydeligt. Dette forhold har sandsynligvis haft for lille opmærksomhed, når arealer til grundvandsbeskyttelse skal udpeges i Danmark med terrænnær kalk i undergrunden (Nilsson med flere, 2022). Erfaringerne fra Midtjylland kan sandsynligvis overføres til de østligste dele af Sjælland (Stevns og Møn), hvor kalken ligeledes ligger tæt på terræn.

2.2 Strømningsforhold i ådalen

I kontakten mellem grundvand og vandløb strømmer grundvandet fra de tilstødende arealer igennem ådalen til vandløbet. Grænseområdet mellem vandløbet og det vandløbsnære areal benævnes den ripariske zone). Ådalens aflejringer er for en stor del sammenfaldende med lavbundsjordene, der kan variere i indhold af organisk materiale fra ingen kulstof til kulstofrige organiske aflejringer.

En konceptuel forståelse for grundvandets strømningsveje igennem ådale til vandløb er beskrevet af Dahl med flere (2007). Strømningsvejene i denne zone kan opdeles i fire strømningsveje (Q1-Q4), der er defineret på baggrund af vejen som vandet strømmer. Strømningsvejen opdeles i diffus matrixstrømning igennem lavere permeable sedimenter (typisk tørv, gytje eller lerede aflejringer) (Q1); overfladisk/overfladenær afstrømning i kulstofrige sedimenter (Q2); direkte indstrømning af grundvand via vandløbsbunden (Q3), eller afstrømning via grøfter eller dræn på tværs af lavbundsarealet (Q4), Figur 1. Næringsstoffer og pesticider i grundvandet, der passerer den ripariske zone via dræn (Q4) eller overfladisk afstrømning (Q2) har en kort opholdstid i denne zone (timer til få dage) og meget begrænset kontakt med organiske aflejringer, da grundvandet essentielt ledes direkte ud i vandløbet. Næringsstoffer og pesticider har således blot begrænset mulighed for tilbageholdelse. Omvendt har den diffuse strømning igennem jordmatricen en forventet opholdstid fra måneder til år med et stort potentiale for omsætning af stoffer i den ripariske zone, inden vandet når ud i vandløbet. Endeligt anslås den del af vandets strømning, der passerer direkte via vandløbsbunden og op i vandløbet at have en opholdstid på få dage i vandløbsbunden. De fire strømningsveje vil bidrage meget forskelligt til den samlede tilstrømning til vandløbet og afhænge af de lokale naturlige og antropogene forhold i den ripariske zone. En eller flere af strømningsvejene vil ofte dominere vandbalancen og være kontrollerende for forureningsbelastning til vandløbssystemet. Der foreligger ganske lidt vide om, hvorledes vandindvinding kan påvirke strømningsvejene under grundvandsindvinding. Hvis afstrømningen er domineret af de tre strømningsveje Q2-Q4, antages det at kunne have stor betydning i det tilfælde hvor grundvandsressourcen overudnyttes hvor gradienten vender, så dele af det indstrømmende grundvand tabes som åvand til grundvandsmagasinet (Figur 4b).

Det skal bemærkes at strømningsvejene Q1-Q4 nær vandløbene ikke er kortlagt i nærværende projekt da projektets formål har været at undersøge strømningsforholdene bredere i de vandløbsnære arealer så grundvandsdannelsen i disse arealer kunne belyses med vandløbsnære vandindvinding.



Figur 1. Konceptuel model for strømningsvejene igennem ådalen til vandløbet (Dahl med flere, 2007).

2.3 Drænafstrømning i grundvandsdannende oplande

Drænrør under landbrugsarealer i det grundvandsdannende opland munder ud i den ripari-ske zone i ådalen og er repræsenteret ved strømningsvej Q_4 til vandløbet (Figur 1). Den ændrer sig væsentligt med vandets hastighed samt forurenende stoffers (næringsstoffer og pesticider) transport fra mark til indvindingsboring i vandløbsnære kildepladser. En korrekt repræsentation af drænafstrømningen i modelopsætningen er vanskelig, men afgørende for at kunne estimere de forurenende stoffers belastning i indvindingsoplandet, herunder transport til vandløbet. Dræning er en lokal proces, styret af lokale jordbundsforhold og drænkon-figurationer, som sjældent er kendt for individuelle marker, hvilket gør det vanskeligt at re-præsentere drænafstrømningens dynamik korrekt i oplandsskalamodeller på grund af be-grænsninger i modellens konceptualisering og en generel mangel på lokale data, der kan indgå i modelkalibreringen. I de tilfælde hvor drændata eksisterer, repræsenterer de almin-deligvis individuelle markarealer, der kun er delvist drænet, og afgrænsning af det faktiske drænede område er ofte usikker. Der findes ganske mange modelstudier i litteraturen, hvor drænafstrømning analyseres ved hjælp af en række semi- til fuldt distribuerede oplandsmo-deller (Boico med flere, 2022). Kun få undersøgelser inkluderer målte drændata i oplands-modellen (De Schepper med flere, 2017; Seidenfaden med flere, 2024). Det bemærkes, at placeringen af dræn i jorden often er ukendt, hvorfor drænene i numeriske modeller ofte er placeret i hele modelområdet i en given dybde. Således aktiveres drænene i modellen blot i områder og perioder, hvor den simulerede grundvandsstand er højere end den angivne drændybde.

Det er tidligere vist, at oplandsskalamodeller har en høj følsomhed for dræningens flowparametre (tidskonstant og dybde), jordens egenskaber (geologi og hydraulik), samt udvekslingen mellem grundvand og grøfter i modelopsætningen (Tiemeyer med flere, 2008). En troværdig geologisk model er vigtigere for modellering af indvindingsoplandet end et indgående kendskab til drænafstrømningen under markfladen i det grundvandsdannende opland. En forbedret hydrogeologisk forståelse kan blandt andet opnås med geofysisk kortlægning (fx tTEM målinger) i det grundvandsdannende opland til vandløbsnære vandindvinding. Der er indikationer på, at underliggende dybere geologi i fx sand eller opsprækket kalk i dybder fra 3-50m dominerer hydraulisk over de øverste jordlag med lavere permeabilitet (første få meter) og dermed påvirker modellens evne til at beregne dynamikken i drænafstrømning. Modeller har vanskeligheder i at forklare de meget store variationer i målt afstrømning mellem drænstationer (De Schepper med flere, 2017; Hansen med flere, 2019).

Yderligere er det vist at modeldiskretiseringen i form af cellestørrelsen har stor betydning for, hvor store mængder af drænvandsafstrømning der simuleres. Som følge af ændringer i størrelsesforholdet af den simulerede drænvandsafstrømning, vil størrelsesordenen af grundvandsudvekslingen til vandløbssystemer også påvirkes. Karan med flere (2021) viste blandt andet, at det simulerede drænvandsbidrag, øges signifikant med en finere cellestørrelse i og omkring vandløbet. Dette skyldtes, at arealer med dræn øges samtidig med at vandløb defineres i en cellestørrelse, der mere retvisende repræsenterede faktiske vandløbsbredder – dette skal ses i forhold til, at en vandløbscelle i en 100 x 100 m modelopsætning defineres i hele udbredelsen af en 100 x 100 m celle til trods for at vandløbet f.eks. blot er 10 m bredt. Således vil et drænareal, der typisk grænser op til et vandløb, være mindre i en model med en 100 x 100 m cellediskretisering end i en modelopsætning med varierende cellediskretisering, hvor et vandløb kunne defineres i en 10 x 10 m celle. Det bemærkes, at ændringer i grundvandsudvekslingen til vandløbssystemer grundet ændringer i drænvandsafstrømningen også vil påvirke stofudvekslingen mellem grundvand og vandløb. Dette skyldes ændringer i grundvandsfluxen, som er styrende for stoftransporten.

2.4 Delkonklusioner

- Oplandsskalamodeller har en høj følsomhed for dræningens flowparametre (tidskonstant og dybde), jordens egenskaber (geologi og hydraulik), samt udvekslingen mellem grundvand og grøfter i modelopsætningen.
- Der er indikationer på, at underliggende dybere geologi (sand / opsprækket kalk i dybder fra 3-50m) dominerer hydraulisk over de øverste jordlag med lavere permeabilitet (første få meter) og dermed påvirke modellens evne til at beregne dynamikken i drænafstrømning. En troværdig geologisk model er vigtigere for modellering af indvindingsoplandet end et indgående kendskab til drænafstrømningen under markfladen i det grundvandsdannende opland. En forbedret hydrogeologisk forståelse kan blandt andet opnås med

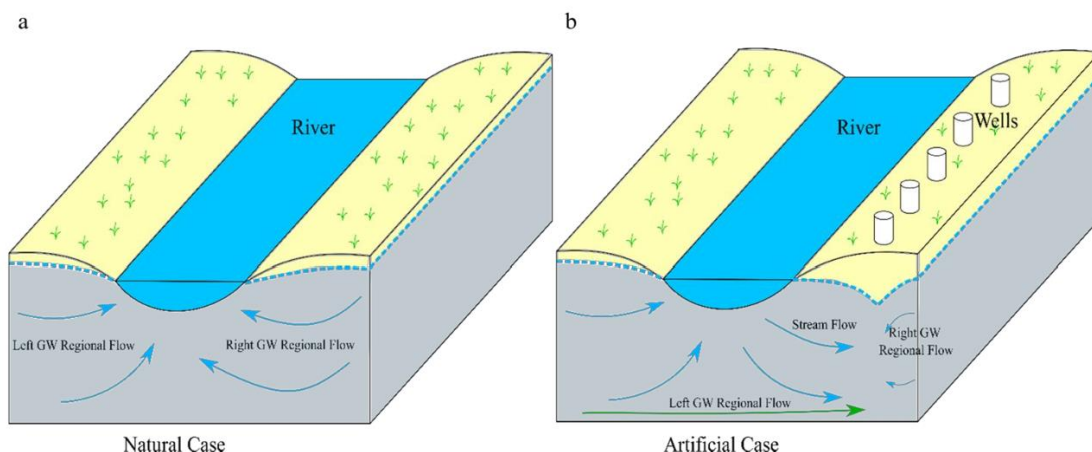
geofysisk kortlægning (f.eks. tTEM målinger) i det grundvandsdannende opland til vandløbsnære vandindvinding.

- Cellediskretiseringen i en modelopsætning kan have betydning for det simulerede drænvandsbidrag til vandbalancen og dermed den simulerede grundvandsudveksling samt stoftransport til vandløb via vandløbsnære arealer med vandindvinding.

3. Strømningsmønstre og grundvandsbeskyttelse i vandløbsnære arealer med grundvands-indvinding

3.1 Konceptuel forståelsesmodel ved vandindvinding

De konceptuelle principper for vandets udveksling mellem grundvand (GW) og vandløbsvand (SW) med og uden vandindvinding er vist i Figur 2. I Figur 2a er vist strømningsforhold i den vandløbsnære zone med en regional grundvandsstrømning under naturlige gradientforhold (dvs. uden oppumpning), der strømmer til vandløbsbunden fra begge sider af vandløbet. I Figur 2b er vist strømningsmønstret med vandindvinding nær det vandløbsnære areal, hvor grundvand strømmer til vandløbet i den ene side og vandløbsvand i den modsatte side trækkes ned i indvindingsboringen under pumpning (Texier med flere, 2022). Nærværende projekts feltundersøgelser søger at afklare, hvorvidt den konceptuelle forståelsesmodel ved vandindvinding også gælder under typiske østdanske forhold hvor vandindvinding i vandløbsnære arealer ofte foregår.

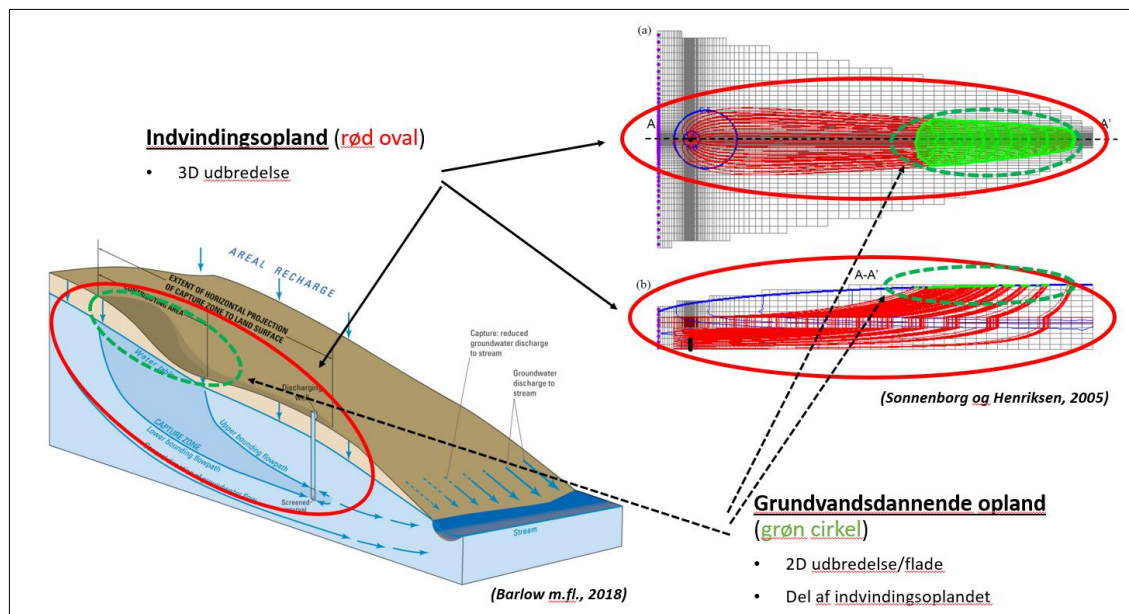


Figur 2. Principskitse af den hydrologiske kontakt mellem grundvand og vandløb. (a) Uden indvinding strømmer grundvand naturligt til vandløbets bund via hele periferien. (b) Et kunstigt påvirket strømningsystem hvor vandindvinding i det vandløbsnære areal trækker åvand ned i grundvandszonen (Texier med flere, 2022)

3.2 Indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande

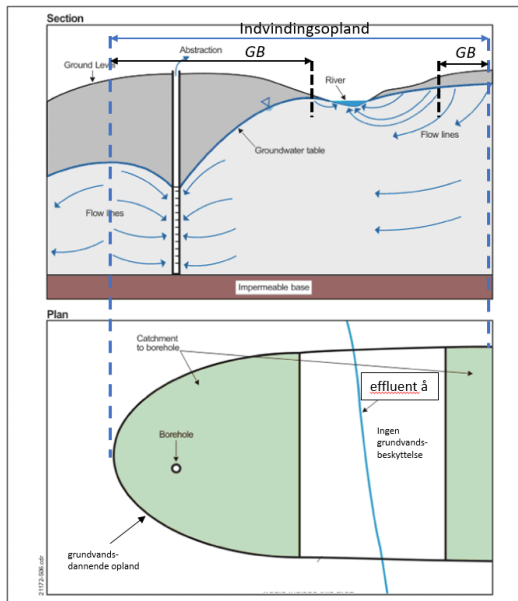
Et grundvandsdannende opland defineres som et todimensionelt areal på jordoverfladen, hvor vand infiltrerer ned til grundvandsspejlet og efterfølgende strømmer videre til boringens indtag der indvindes fra (Miljøstyrelsen, 2018). Indvindingsoplandet til en boring er et tredimensionelt område i grundvandsmagasinet, hvor grundvandet strømmer hen imod indvindingsboringen og er yderligere defineret af strømningslinjerne, som markerer grænsen

mellem grundvand, der indfanges af indvindingsboringen og grundvand, der ikke indfanges (Sonnenborg og Henriksen, 2005), Figur 3.

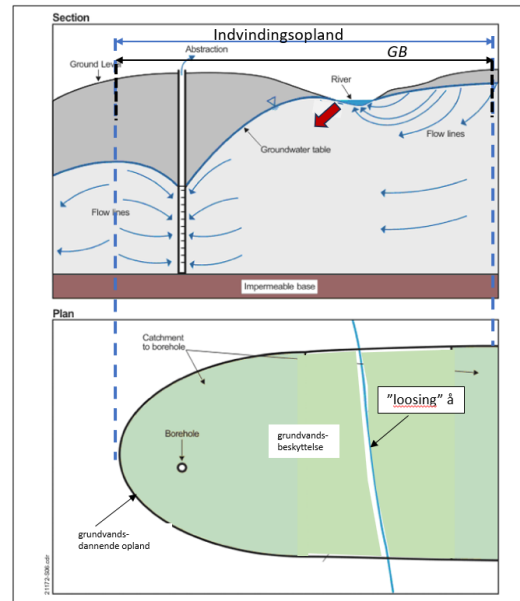


Figur 3. Koncepter for indvindingsoplande og grundvandsdannende oplande. Med røde cirkler er vist indvindingsoplande i 3D udbredelse og de grundvandsdannende oplande med grønne stiplede cirkler i 2D udbredelse / flade. Sammenstillet fra Barlow med flere (2018) og Sonnenborg & Henriksen (2005).

En konceptuel model af vandets strømning ved en vandløbsnær kildeplads er vist i Figur 4. I Figur 4a (øverst) er vist en principskitse af indvindingsoplande ved vandløbsnære arealer, hvor vandløbet modtager grundvand i hele sin bundperiferi, mens der foregår grundvandsindvinding. Det vil sige at der er opadrettede gradientforhold på begge sider af vandløbet hele tiden. I Figur 4a (nederst) ses det grundvandsdannende opland, hvor det grønne område markerer arealet med potentielt behov for grundvandsbeskyttelse. Figur 4b (øverst) viser den samme konceptuelle model, men hvor gradienten på den ene side af vandløbet er nedadrettet, så vandløbet kan tabe vand via vandløbsbunden til grundvandszonen under for kraftig indvinding af grundvand. Figur 4b (nederst) viser, at dele af indvindingsoplandet, der ikke tidligere havde behov for grundvandsbeskyttelse, nu også behøver grundvandsbeskyttelse i de vandløbsnære arealer.



(a) Effluent vandløb-grundvand kontakt med begrænset grundvandsbeskyttelse

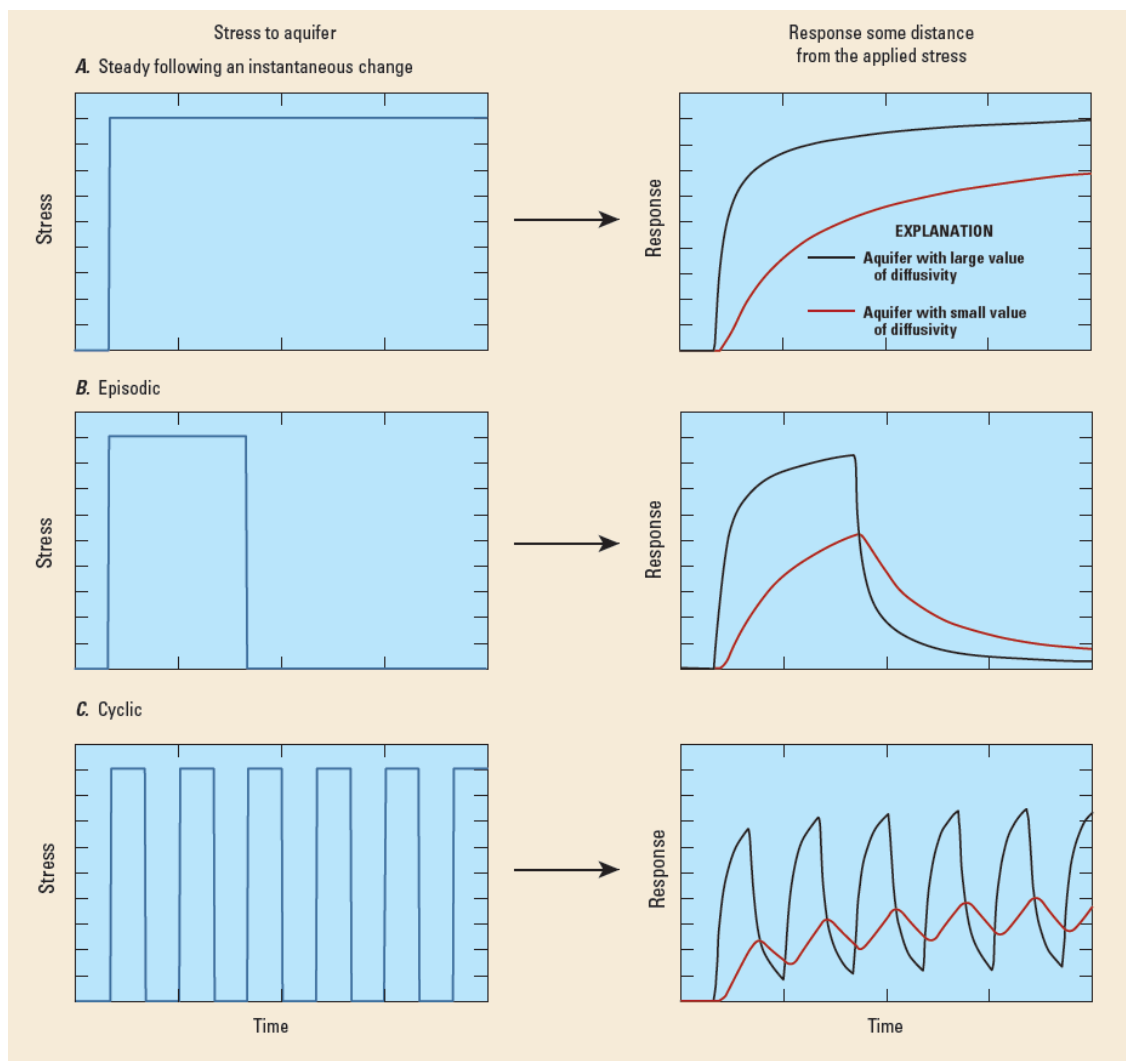


(b) "Loosing" vandløb-grundvand kontakt med grundvandsbeskyttelse (GB) på hele det grundvandsdannende opland

Figur 4. Grundvandsbeskyttelse (GB) af arealer i det grundvandsdannende opland, hvor (a) vandløbet modtager grundvand og (b) vandløbet på hele eller dele af vandløbsstrækningen taber åvand til grundvandsmagasinet (rød pil) (modificeret fra EA, 2019).

3.3 Ændringer i grundvand- og vandløbsudveksling ifm. grundvandsindvinding

Ved ændringer i vandløbsnær grundvandsindvinding vil strømmingen til og fra et vandløb kunne påvirkes, og det kan være vigtigt at vurdere, hvor hurtig og/eller hvor stor betydning påvirkningen fra indvindingen har. Magasintallet, S , er afgørende for responstiden og påvirkningsgraden fra ændringer i grundvandsindvindingen. Dette skyldes, at den såkaldte diffusivitet er defineret, som transmissiviteten, T , divideret med magasintallet, S . Ved høj diffusivitet vil responstiden fra ændringen i grundvandsindvindingen være hurtigere og dermed påvirke vandløbet hurtigere. Tilsvarende vil størrelsen af påvirkningen på vandløbet som følge af ændringen i grundvandsindvindingen være større ved høj diffusivitet. Ved lav diffusivitet vil responstiden fra ændringer i grundvandsindvindingen være langsommere og dermed påvirke vandløbet langsommere og i mindre grad. For spændte og frie grundvandsmagasiner med ens transmissivitet gælder det, at diffusiviteten er flere størrelsesordner større for de spændte grundvandsmagasiner. Det skyldes, at magasineringspotentialet, dvs. grundvandslageringen, for et frit grundvandsmagasin er væsentlig større end et spændt grundvandsmagasin. Dette kommer til udtryk ved magasintallet, der for det frie magasin, S_y , generelt svarer til porøsiteten, mens magasintallet for det spændte magasin, S_s , er flere størrelsesordner lavere. Betydningen af diffusivitets størrelse og dets påvirkning på vandløbsnær grundvandsindvinding er vist i Barlow og Leake (2012) og eksemplificerer diffusivitets betydning på vandløbet (Figur 5).



Figur 5. Påvirkning af vandløbsnær grundvandsindvinding på nærliggende vandløb. Responset som følge af variationer i grundvandsindvindingen er vist for forskellige diffusivitetsværdier. I den venstre kolonne vises variationerne i indvindingen ved tre forskellige scenarier (A-C), mens responset i det nærliggende vandløb er vist i den højre kolonne. De sorte linjer repræsenterer relativ høj diffusivitet og røde linjer repræsenterer relativ lav diffusivitet (Fra Barlow og Leake, 2012).

I øverste række i Figur 5 (scenarie A) er vist påbegyndelsen af en vandløbsnær grundvandsindvinding, som efterfølgende er konstant over tid. Responset viser, hvorledes påvirkningen fra indvindingen indfinder sig hurtigere og i større grad ved høj diffusivitet relativt til situationen med lav diffusivitet. Det samme gør sig gældende for scenarie B og C, hvor grundvandsindvindingen ikke er konstant. For både scenarie B og C er det tydeligt, at effekten ved ophør i grundvandsindvindingen sker hurtigere og mere markant ved høj diffusivitet end det er tilfældet ved lav diffusivitet. Således fremgår det, at lav diffusivitet medfører lang responstid, men høj diffusivitet medfører kort responstid.

3.4 Kortlægning af strømningsveje med stabile iltisotop målinger

I Partnerskabsprojektet er det valgt også at fokusere på anvendelsen af stabile iltisotoper til identifikation af strømningsveje og arealer med grundvandsdannelse i vandløbsnære arealer

under vandindvinding. Iltisotop analyser kan medvirke til at understøtte/forkaste konceptuelle strømningsmodeller. Stabile iltisotop analyser udnytter forholdet mellem de tunge (^{18}O) og lette (^{16}O) iltisotoper i vandmolekyler til at karakterisere vand fra forskellige kilder. Eksempelvis vil vandmolekyler fra en sø og fra grundvand typisk have forskellige forhold mellem tunge og lette iltisotoper. Det skyldes, at en sø vil være udsat for fordampning, hvorved det lettere iltisotop sandsynligvis vil fordampe og efterlade ^{18}O koncentrationen i søen beriget sammenlignet med grundvandet (Krabbenholt med flere, 1990). På samme måde varierer stabil iltisotopforholdet i nedbør gennem året grundet variationer i temperaturen. Således vil gennemsnitlige isotopsammensætninger over tid ofte variere for nedbør og grundvand. Det skyldes, at nettonedbør primært dannes ved større nedbørshændelser, hvorved det gennemsnitlige isotopforhold i grundvandet får en relativt ensartet isotopsammensætning i forhold til det gennemsnitlige isotopforhold i nedbør.

Ved at sammenholde isotopsammensætningen fra forskellige lokaliteter, er det muligt at udlede viden om vandets strømningsveje.

3.5 Delkonklusion

- For at udpege optimale arealer til grundvandsbeskyttelse i vandløbsnære grundvandsdannende oplande er det afgørende, at lokale gradienter i det hydrauliske trykniveau er kendte i både tid og rum. Kendskab til lokale hydrauliske gradienter vil have betydning for hvilke områder, der påvirkes af vandløbsnær grundvandsindvinding.
- I forhold til vandløbsnær grundvandsindvinding er det nødvendigt at estimere diffusiviteten for at forstå indvindingens effekt på vandløbet. Diffusiviteten (T/S) er styrende for omfanget, hvormed vandløbsnær indvinding påvirker et vandløb.
- For at vurdere påvirkningen af vandløbsnær grundvandsindvinding, kan isotopanalyser belyse udvekslingen mellem grundvand og overfladevand. Iltisotopforholdet vil typisk være forskelligt for overfladevand og grundvand. Derfor kan iltisotopforholdet belyse strømningsveje for forskellige kilder.

4. Modellering af grundvandsudvekslingen mellem grundvand og vandløb

4.1 Simulering af strømningsveje i forhold til grundvand-vandløbsudveksling

De teoretiske principper for grundvandets strømningsveje er velkendte og beskrevet i detaljen af blandt andet Toth (1963). Det er dog vanskeligt at bestemme grundvandets strømningsveje i den virkelige verden, hvor den hydrogeologiske heterogenitet er allestedsnærværende. Derfor anvendes ofte numeriske (matematiske) modeller, der beskriver de fysiske principper for grundvandets bevægelse til at estimere dets strømningsveje. I modellerne forsøges det så vidt muligt at tage hensyn til den rumlige hydrogeologiske kompleksitet. Det betyder, at kendskab til variationen i f.eks den geologiske opbygning, vandløbsgeometri og klima inden for et givent område forsøges indarbejdet i modellerne.

I forbindelse med modellering af udvekslingen mellem grundvand og vandløb anvendes ofte en såkaldt trykafhængig flux randbetingelse til at repræsentere et givent vandløb. Således vil grundvandet strømme til vandløbet, hvor vandføringen er givet ved en lineær funktion mellem akviferens hydrauliske trykniveau og vandløbets hydrauliske trykniveau. Omvendt vil vandløbet tabe vand til akviferen i situationer, hvor det hydrauliske trykniveau i akviferen er lavere end i vandløbet (Anderson med flere, 2015). Beregningen af flow raten Q (m^3/d) til/fra vandløbet er givet ved:

$$Q = C(h_a - h_v) \quad (1.a)$$

$$C = KA/L \quad (1.b)$$

hvor h_a er simuleret hydraulisk trykniveau (m) i akviferen, h_v er specificeret hydraulisk trykniveau (m) i vandløbet, K er hydraulisk ledningsevne (m/s), A er strømningsarealet (m^2) og, L er strømningslængden (m). I det tilfælde, at der specificeres et konstant hydraulisk trykniveau langs vandløbet, er der ikke restriktioner i forhold til hvor meget vand, der kan tilføres eller tages til og fra vandløbet i en model. Derfor forsøges det ofte at simulere vanddybden i vandløbet ved at anvende Manning formelen. I MODFLOW vil det kunne være i form af STR eller SFR2 pakkerne, mens det i MIKE SHE ville kunne være i form af MIKE11 eller MIKE HYDRO. Således kan mere eller mindre detaljerede oplysninger for vandløbsgeometrien indgå til at beregne vanddybden. Ved at beregne vanddybden bliver det muligt at simulere en rumligt varierende vanddybde baseret på fysiske principper og dermed at simulere rumligt varierende hydrauliske trykniveauer i vandløbet. Således er det den simulerede vandløbsdybde, der er afgørende for udvekslingen mellem grundvand og vandløb fremfor et specificeret hydraulisk trykniveau langs vandløbet. Derfor anbefales det så vidt muligt at repræsentere vandløb, hvor vandløbsdybden beregnes explicit.

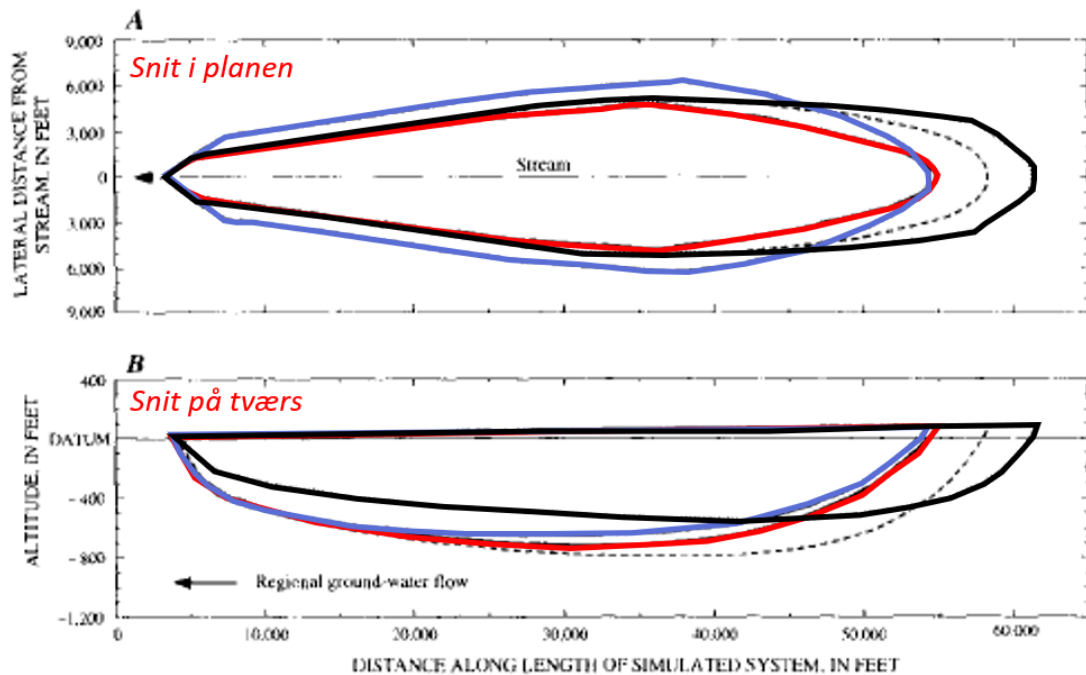
4.2 Partikelbane simuleringer

For at bestemme vandets strømningsveje og transporttider til og fra en indvindingsboring eller en vandløbslokation anvendes partikelbane simuleringer. Det er muligt også at anvende stoftransport simuleringer, dog er disse ofte forbundet med længere simuleringstider. Partikelbanesimuleringer foretages typisk efter en hydrologisk model er opsat og vurderet repræsentativ for et givent område. I praksis er partikelbanesimuleringer en del af model postprocessingen. I MODFLOW kan partikelbanesimuleringer udføres som såkaldte forward eller backward simuleringer, mens partikelbanesimuleringerne i MIKE SHE sker med forward simuleringer. I MODFLOW er partikelbanesimuleringen baseret på advektiv strømning uden hensyntagen til dispersion. Det vil sige at vandpartiklers strømningsveje beregnes på baggrund af Darcy fluxen, således at de simulerede strømningsveje og strømningstider udelukkende er baseret på porevandshastigheden. I MIKE SHE er partikelbanesimuleringen baseret på advektions-dispersion ligningen ved hjælp af en random-walk metode. Således inkluderes dispersion ved tilfældigt at lade partikler forskydes efter at partiklen har bevæget sig advektivt (Sonnenborg og Henriksen, 2005). Forskellen i forward- og backward simuleringer ligger i at partiklerne simuleres som fremadstrømmende eller bagudstrømmende. I en forward simulering placeres typisk et givent antal partikler i de øverstliggende vandførende modelceller for at beregne, hvor partiklerne strømmer hen og dermed, hvor partiklerne ender. I en backward simulering, placeres et givent antal partikler i relevante modelceller (f.eks en indvindingsboring) for at beregne, hvorfra partiklerne strømmer og dermed, hvorfra partiklerne oprinder. Både forward og backward simuleringer benyttes til at beregne indvindingsoplande såvel som grundvandsdannende opland (Sonnenborg og Henriksen, 2005; Henriksen med flere, 2017; Barlow med flere, 2018).

Hvorvidt partikelbanesimuleringer er et effektivt redskab til at estimere grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande, afgøres af flere opmærksomhedspunkter, der bør tages i betragtning ved anvendelsen af partikelbanesimuleringer. I den seneste Hydrologiske geovejledning (Henriksen med flere, 2017) er der listet en række generelle modeltekniske opmærksomhedspunkter. Her vil vi primært fokusere på opmærksomhedspunkter for partikelbanesimuleringer, som ikke fremgår i Henriksen med flere (2017), og som mestendels relaterer sig partikelbanesimuleringer i områder med udveksling mellem grundvand og overfladevand.

Modica med flere (1997) anvendte et generisk hydrologisk system med et frit magasin til at vurdere betydningen af forskellige modelparametre, anvendt til at repræsentere den fysiske virkelighed i områder med udveksling imellem grundvand og overfladevand, i forhold til simulerede vandløbsoplande. Ved de såkaldte backwards partikelbanesimuleringer nedstrøms i et vandløb, vurderede Modica med flere (1997) betydningen af blandt andet anisotropifaktoren (forholdet imellem den horisontale hydrauliske ledningsevne og den vertikale hydrauliske ledningsevne) og magasintykkelsen. Ud fra et reference scenarie viste Modica med flere (1997), at en øget anisotropifaktor medfører en større udbredelse af vandløbsoplandet i planen. Dette skyldes, at den øgede anisotropifaktor i form af en mindre vertikal hydraulisk ledningsevne forårsager en større modstand i den vertikale retning og derfor forcerer grundvandets udbredelse i den horisontale retning og dermed øger udbredelsen af vandløbsoplandet (Figur 6). I forhold til magasintykkelsens betydning for simulerede oplande viser Modica med flere (1997), at mindsket magasintykkelse også medfører større

udbredelse af vandløbsoplandet i planen. Det skyldes, at reduktionen i magasintykkelsen forhindrer grundvandet i at strømme dybere, hvorfor den horisontale udbredelse øges (Figur 6). Påvirkningen af anisotropifaktoren og magasintykkelsen på simulerede vandløbsoplande vil have en tilsvarende indvirkning på grundvandsdannende oplande i forbindelse med grundvandsindvindingsboringer. Dermed vil udbredelsen af et simuleret grundvandsdannende opland også være afhængig af hvilken anisotropifaktor, der anvendes og mægtighederne af magasinerne, som partiklerne strømmer igennem.

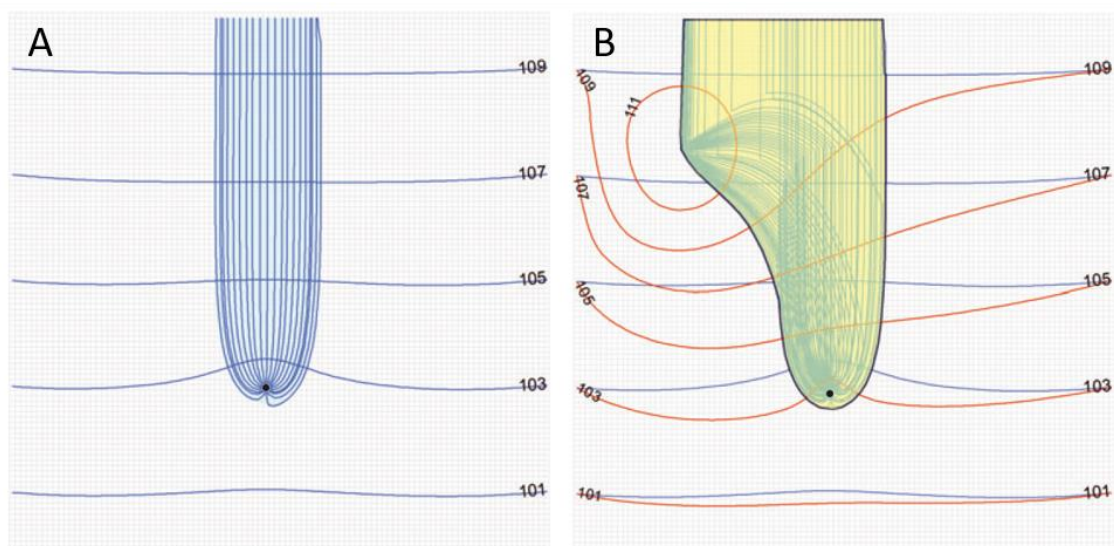


Figur 6. Parameterbetydning for simulerede oplande ved grundvand-overfladevandsudveksling, ved ændring i anisotropifaktor og magasintykkelse. Den røde markering repræsenterer et reference scenarie for et opland, den lilla repræsenterer oplandet ved øget anisotropifaktor, og den sorte repræsenterer oplandet ved mindsket magasintykkelse. Modificeret fra Modica med flere (1997).

I numeriske modeller til at beregne grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande, er det ikke gængs procedure at inkludere anisotropifaktoren ved kalibrering mod historiske data. Derimod fastsættes anisotropifaktoren typisk inden kalibrering, hvorefter den horisontale hydrauliske ledningsevne kalibreres. Eksempelvis er der i DK-modellen antaget en anisotropifaktor på 10 i samtlige hydrostratigrafiske lag med undtagelse af opsprækkede lerlag, hvor anisotropifaktoren er specificeret til 100 (Stisen med flere, 2019). Der kan være forskellige årsager til at anisotropifaktoren ikke medtages i kalibreringen til trods for, at det kan være en følsom parameter. Som det er tilfældet i Karan med flere (2021), hvor anisotropifaktoren også blev fastsat til 10 selv om denne var følsom, kan det skyldes, at anisotropifaktoren er korreleret til andre mere følsomme parametre. Ikke desto mindre anbefales det at forsøge, at indarbejde anisotropifaktoren i kalibreringen, hvor det er muligt. Det skyldes, at datagrundlaget i form af tilgængelige observationer er afgørende for, hvilke parametre der er korrelerede. Således kan der være tilfælde, hvor det er muligt at kalibrere anisotropifaktoren. Yderligere er der gennem det seneste årti sket en udvikling og implementering af numeriske metodikker til at inkludere korrelerede parametre i modelkalibreringen, så sandsynligheden for at kalibrere korrelerede parametre øges (Anderson med flere, 2015).

I forhold til magasinmægtigheden, som også har indvirkning på udbredelsen af det grundvandsdannende opland anbefales det, at implementere lokal viden om magasinmægtigheder. Det skyldes, at lokale hydrologiske modeller ofte tager udgangspunkt i regionale modeller, f.eks. DK-modellen, der ikke nødvendigvis har lokale mægtighedsforhold indarbejdet i tilstrækkelig grad. Modificering af magasinmægtigheder baseret på detaljeret viden inden for relevante lokale områder med grundvandsindvinding forventes at føre til simulerede oplande, som i højere grad er repræsentative relativt til oplande baseret på regional repræsentation af magasinmægtigheder.

For partikelbanesimuleringer, som anvendes til at beregne grundvandsdannende oplande samt indvindingsoplande, er det fundet, at tidspunktet for frigivelsen af partiklerne har betydning for udbredelsen af de beregnede oplande. I transiente (ikke-stationære) modeller, hvor der enten frigives partikler til partikelbanesimuleringerne ved det første tidskridt i en forward simulering eller i sidste tidskridt i en backward simulering, vil de simulerede oplande ikke nødvendigvis være korrekte (Rayne med flere, 2014). Variationen i udbredelsen kan være forskellig for partikler, der er frigivet ved samme lokation, men til forskellige tidspunkter. Det skyldes, at strømningshastigheden ved en given lokalitet for frigivelsen af partikler kan variere under forskellige stress perioder i den transiente model. Dvs., at partikler, som bliver frigivet fra samme lokalitet, kan strømme langs forskellige strømningsbaner grundet de tidlige ændringer i strømningsfeltet forårsaget af f.eks. tidlige variationer i nettonedbøren, som påvirker strømningshastigheder (Rayne med flere, 2014). I Figur 7 et vist et eksempel fra Rayne med flere (2014), som viser resultaterne fra partikelbanesimuleringer, hvor partikler er frigivet ved de samme lokaliteter, men forskellige tidskridt. Således viser Figur 7A, indvindingsoplande vist i planen, simuleret ved backward partikelbanesimulering med partikler frigivet ved det sidste tidskridt mens Figur 7B viser indvindingsoplande i planen med partikler frigivet ved sidste tidskridt af hver stress periode. Det bemærkes, at de viste oplande er indvindingsoplande set i planen, hvilket betyder at de grundvandsdannende oplande ikke er vist explicit, men derimod er en del af de viste oplande. Ikke desto mindre fremgår det tydeligt, at slut positionerne for partiklerne, ved backward partikelbanesimulering, har ændret sig væsentlig i Figur 7B relativt til Figur 7A. Derfor er det grundvandsdannende opland (svarende til slutpositionerne for partiklerne i en backward partikelbanesimulering) også ændret væsentligt og eksemplificerer, hvorledes simulerede grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande påvirkes af tidspunktet, hvormed partiklerne frigives. I overensstemmelse med Rayne med flere (2014) anbefales det, at der ved partikelbanesimuleringer i transiente modeller tages hensyn til variationen af strømningsmønstret under de forskellige stressperioder og at der frigives partikler i alle stressperioder. En stress periode angiver perioder, hvor en variabel, f. eks. i form af en pumpe rate, holdes konstant. Hvis en pumpe rate varierer, vil modellen derfor have flere stressperioder. Således anbefales det, at der frigives partikler ved alle stressperioderne, idet der kan opstå væsentlige forskelle i forhold til blot at frigive partikler ved den første stressperiode.



Figur 7. Partikelbanesimuleringer og simulerede oplande for partikler frigivet ved en stressperiode (A) og ved hver stressperiode (B). De blå konturlinjer viser det hydrauliske trykniveau i den sidste stressperiode, og de orange konturlinjer viser det hydrauliske trykniveau i den mellemste stressperiode. Den sorte prik viser indvindingsboringen (Efter Rayne med flere, 2014).

4.3 Simulering af påvirkningen fra variationer i vandløbsnær grundvandsindvinding

Betydningen af diffusiviteten er kort beskrevet i afsnit 3.3. Ændringer i grundvand- og vandløbsudveksling ifm. grundvandsindvinding. Idet høj diffusivitet fører til hurtigere respons og større påvirkning af ændringer i grundvandsindvindingen på nærliggende vandløb end lav diffusivitet (Figur 5), vil variationer i magasintykkelse, hydraulisk ledningsevne, og magasintal have betydning for påvirkningen. Som nævnt i afsnit 3.3. Ændringer i grundvand- og vandløbsudveksling ifm. grundvandsindvinding, er diffusivitet defineret som forholdet mellem transmisiviteten og magasintallet (T/S). Yderligere er transmisiviteten defineret som den hydrauliske ledningsevne multipliceret med magasintykkelsen. Derfor vil variationen i den hydrauliske ledningsevne og magasintykkelsen sammen med magasintallet have betydning for diffusiviteten og dermed påvirkningen af vandløbet. Det er ikke altid, at magasintallet bliver kalibreret til trods for at parameteren er følsom (Stisen med flere, 2019), men hvor det er muligt, anbefales det at magasintallet søges tilpasset til lokale forhold, som det også er tilfældet for magasintykkelser omtalt i ovenfor. Derudover er det velkendt at den hydrauliske ledningsevne inden for det samme grundvandmagasin varierer grundet den allestedsnærværende geologiske heterogenitet. Derfor anbefales det, at den rummelige variation i den hydrauliske ledningsevne søges indarbejdet i modellerne, hvor det er muligt, da variationen forventes at lede til mere repræsentative estimater for påvirkningen af vandløbsnær grundvandsindvinding.

4.4 Modelusikkerhed i den vandløbsnære zone med statens grundvandskortlægningsmodeller (geologi og hydrologi) – hvad mangler af data ?

Vandbalanceudtræk fra DK-modellen, DK1 Sjælland OSD, viser for en kørsel uden grundvandsindsivning til vandløb på 49 mm/år og udsivning på blot 0,18 mm/år (gennemsnit 1991-2021). Der er dog en række modeltekniske forenklinger bag disse tal, og i realiteten kan forholdene være noget mere komplekse, f.eks. kan der i visse perioder ske overløb fra vandløb (overbank spilling) til ådalen, eller grundvandsdannelse i ådalen hvor det terrænnære grundvandspotentiale ligger under drændybden. Der kan i skybrudssituationer eller ved langvarig kraftig regn/eventuel stormflod i de nedre dele af vandløbene også stuves vand op fra vandløb i drænsystemer. Således kan der fra disse områder sive vand til det dybere grundvand, hvis der forekommer terrænnære vandførende magasiner med en dybde til vandspejlet, der ligger under drænniveauet (f.eks. efter en lang, tør sommer eller nogle tørre år, efterfulgt af kraftig regn eller skybrudshændelser).

Ved aktuel indvinding er tallene for ind- og udsivning stort set identiske med scenariet for grundvandsindvinding gældende for hele DK1 Sjælland modellen, blot introduceres der tæt på kildepladser og boringer en sænkningstragt. Det er ikke muligt at generalisere i forhold til størrelsen på sænkningstragten – det vil variere afhængig af akviferens hydrauliske egenskaber. En pragmatisk måde at beregne sænkningstragtens størrelse på er at subtrahere simulerede potentialkort for to scenarier (med og uden indvinding). Sænkningstragten forøger risikoen for nedadrettet gradient og sænkning af det terrænnære vandspejl til under drænniveauet, hvorved der etableres en permanent eller temporær nedadrettet gradient fra det terrænnære magasin til magasinet, hvor indvindingen finder sted. Der er dog behov for at få belyst, om der er lokale forhold omkring kildepladserne, der øger nedsivningen væsentlig ved nedadrettede gradientforhold. Simuleringsresultater af grundvandsindvinding fra større kildepladser (eksempel Eksercermarken kildeplads i Odense) viser, at indvindingen skaber periodevis nedadrettede hydrauliske gradienter i områderne nær vandløbene (Kidmose og Sonnenborg, 2018). Følgelig beregner modellerne indvindingsoplande, der også omfatter ådalene. Således indikerer modelberegningerne, at der er øget risiko for forureningstransport fra overfladevandssystemet til kildepladsernes ånære boringer, det være sig f.eks. nitrat eller pesticider. Simuleringsresultaterne er dog behæftet med en væsentlig men ikke kvantificeret usikkerhed, blandt andet fordi indvindingsoplandene beregnes på baggrund af partikelbanesimuleringer, hvor partiklerne frigives under drænniveau, eller fordi modelstruktur usikkerheder ikke indgår i analysen.

Et selvstændigt problem af særlig relevans for dette projekt er derfor, at modellerne ikke er konceptualiseret til at repræsentere detaljerede hydrauliske forhold i vandløbsnære områder, hvor hydrogeologien kan være markant anderledes end i resten af oplandet. Dette hænger sammen med, at modellernes evne til at repræsentere de faktiske hydrologiske forhold i ådalen er baseret på de tilgængelige observationer i det samlede opland. Dermed repræsenterer modellerne de generelle strømningsforhold (hydrauliske gradienter) inden for et opland og ikke specifikke forhold i og omkring vandløbsnære områder. Undersøgelser fra lavbundsarealer har f.eks. vist, at dybden til terrænnært grundvand i ådale baseret på f.eks. HIP modellen er væsentlig mere kompleks end simuleret med f.eks. HIP 10m maskinlæringsmodel. Der er en række præferentielle strømningsveje, heterogeniteter og antropogene forhold og

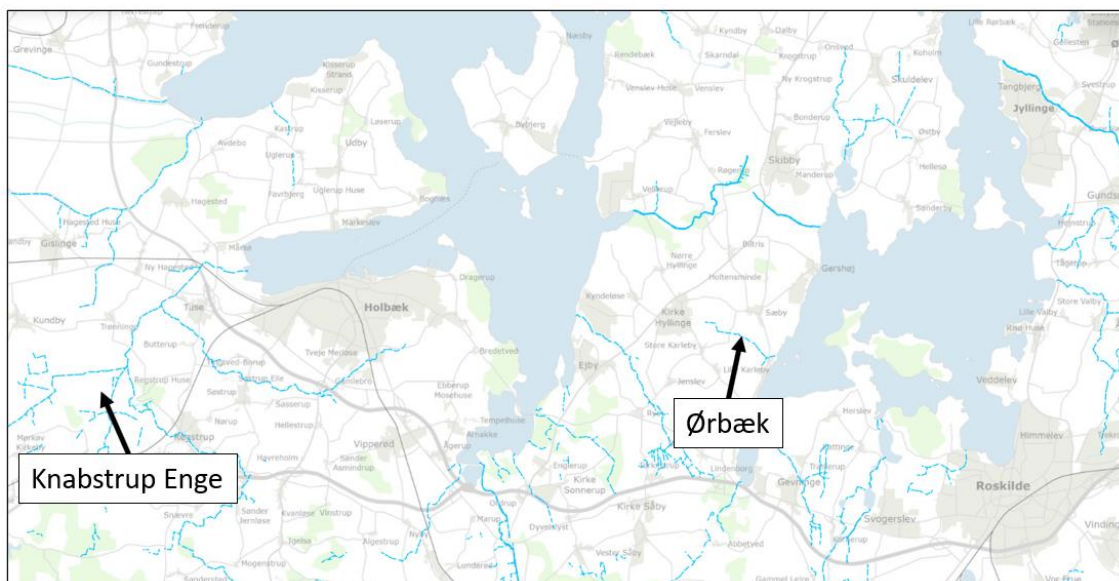
processer, der ikke er fuldt ud repræsenteret i hverken kortlægningsmodeller eller partikelbanesimuleringer og det betyder, at lokale hydrologiske forhold (f.eks. oversvømmelser i ådalene) ikke altid er repræsenteret ved modelsimuleringerne.

4.5 Delkonklusion

- For at simulere repræsentative oplande på baggrund af grundvandsmodeller er det nødvendigt at tilegne sig information om anisotropi forhold såvel som magasintykkelser og indarbejde disse, da begge påvirker udbredelsen af simulerede oplande. Faktiske udledte værdier for horisontale ledningsevner kan indgå som start parametre i en kalibrering, hvor anisotropifaktoren også indgår. Yderligere, bør lokale målinger og tolkninger af magasintykkelse indgå i den numeriske konceptuelle model,
- Det er velkendt, at cellediskretiseringen i modellerne har betydning for nøjagtigheden af partikelbanesimuleringerne. Således kan der være behov for finere cellediskretisering i forskellige interesseområder. Yderligere kan cellediskretiseringen også have betydning for udvekslingen mellem grundvand og vandløb (omtalt i afsnit 2.3).
- I forhold til at beregne oplande, kan der være store forskelle i udbredelsen af disse i dynamiske modeller (ikke-stationære) alt efter om partiklerne i modellen frigives til ét bestemt tidskridt eller om partiklerne frigives ved hvert tidskridt.
- Hydrogeologiske forsimplinger i form af manglende heterogenitet inden for enkelte grundvands-magasiner, kan føre til ikke-repræsentative karakteristika i forhold til udvekslingen mellem grundvand og vandløb. Det skyldes, at styrende parametre, såsom transmissivitet og magasintal er afgørende for diffusiviteten, som igen er styrende for påvirkningen af vandløbsnær grundvandsindvinding.
- Generelt anbefales det, at lokale påvirkninger og effekter af vandløbsnær grundvandsindvinding optimalt bør simuleres under hensyntagen og indarbejdelse af lokal heterogenitet og de herover omtale hydrauliske egenskaber såvel som konceptualisering i forhold til cellediskretisering.

5. Analyse af feltundersøgelser ved to Fors A/S kildepladser

I Partnerskabsprojektet inddrages målinger fra feltundersøgelser på to af Fors A/S' kildepladser (Knabstrup Enge og Ørbæk) til validering af den præsenterede konceptuelle forståelsesmodel, hvor strømningsforhold vurderes i de vandløbsnære arealer med og uden grundvandsindvinding (jf. Figur 2 og 4). Placeringen af de to kildepladser er vist på Figur 8. Knabstrup Enge er bl.a. udvalgt, da der skal søges ny indvindingstilladelse til Knabstrup Enge. Resultaterne fra undersøgelserne forventes at indgå som et vigtigt element i vurdering af, hvorvidt en fremtidig grundvandsindvinding på kildepladsen kan have en potentiel negativ påvirkning på vandføring i vandløb og grundvandsafhængige terrestriske økosystemer (GATØ) ved kildepladserne. Ørbæk Kildeplads er valgt, da det er en klassisk case med indvindingsboringer placeret tæt ved vandløb med stor risiko for direkte påvirkning på kontakten mellem grundvand og vandløbet. Desuden har Fors A/S et stort arbejde i gang med grundvandsbeskyttelse på arealerne tæt ved vandløbet. Spørgsmålet er så om udstrækningen af grundvandsbeskyttelsen er tilstrækkelig og hvordan grundvandsindvinding påvirker spredning af forurening på kildepladsen, og sekundært, hvordan grundvandsindvinding påvirker Ørbækken. Resultaterne fra undersøgelserne forventes at blive anvendt til at optimere indvindingen på kildepladsen. Selvom begge lokaliteter er drænet, er der ikke fokus på dræn-data i nærværende undersøgelser. Det skyldes, at drænenes udbredelse og påvirkning sker over et areal, som er større end, hvad der indgår i nærværende feltundersøgelser. Som det fremgår herunder, baserer undersøgelserne sig på transekt undersøgelser, hvor monitoreringen af grundvandsstanden og indsamlingen af vandprøver sker i eksisterende indvindingsboringer og nyetablerede terrænnære monitoringsboringer, der så vidt det har været muligt er placeret langs en linje. Således giver undersøgelserne et indblik i grundvandsstrømningen set ud fra et to-dimensionalt perspektiv, hvor drænenes påvirkning ikke lader sig belyse.



Figur 8. Koncept afprøvning ved feltundersøgelser på to af Fors' kildepladser (Knabstrup Enge og Ørbæk). §3 beskyttede vandløb vist med blå streger.

5.1 Knabstrup Enge kildeplads

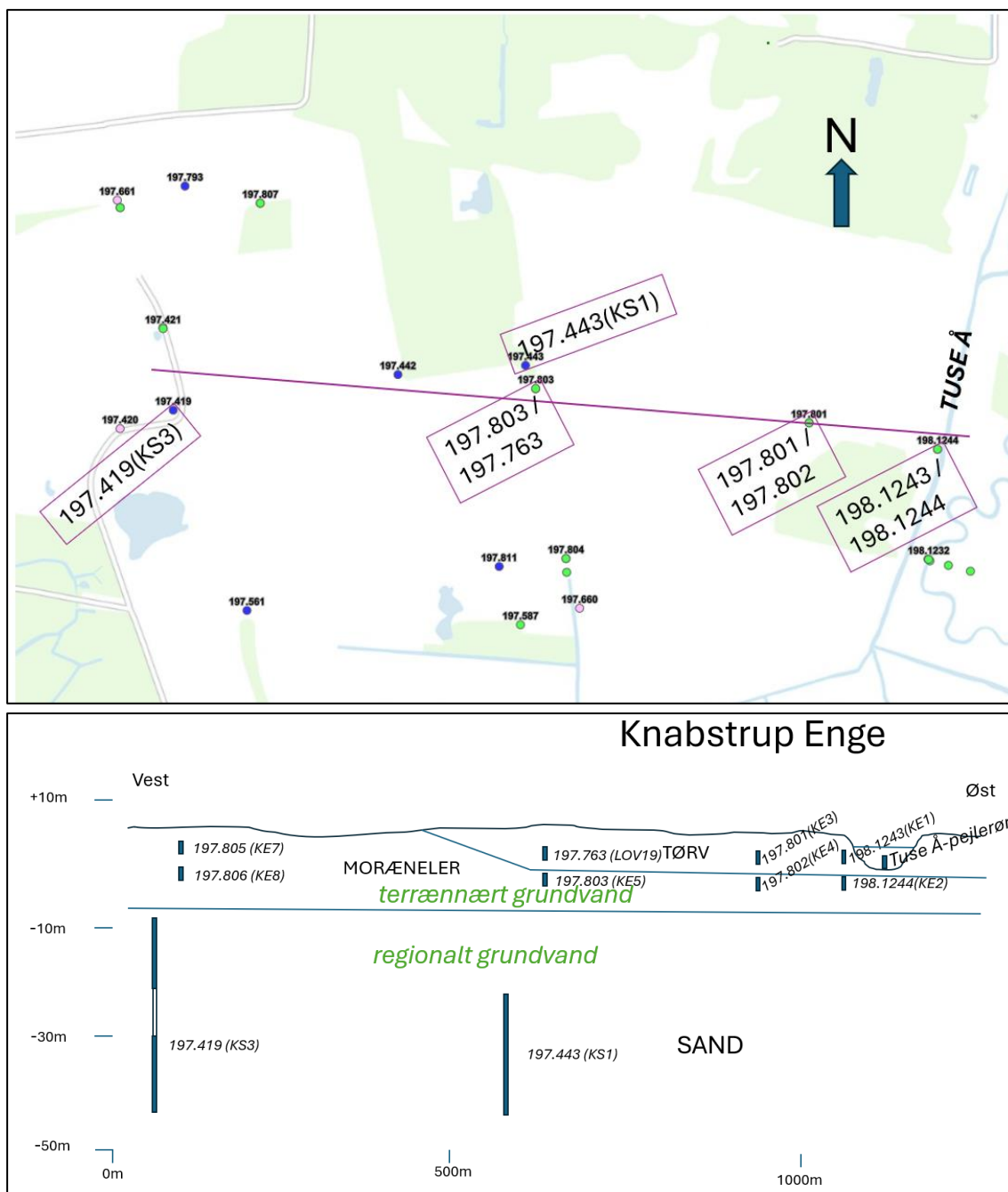
5.1.1 Anvendte metoder

Følgende metoder er anvendt til beskrivelse af jordbundsforhold, strømningsforhold og vandføring i vandløb.

- Korte boringer etableret med beskrivelse af jordbundsprofiler (Bilag 1).
- Datalogger til pejling af vandstanden installeret hovedparten af boringerne. Øvrige boringer håndpejlet i forbindelse med prøvetagninger i perioden 15. september 2023 til 3. oktober 2024.
- Stabile iltisotoper udtaget til beskrivelse af strømningsveje i grundvand og til beskrivelse af nedbør.
- Flow målinger i vandløbsstation til etablering af Q-h relation.
- Baseflow måling start august 2024 flere steder i Tuse Å og i Kobbø Å med det formål at identificere potentielle vandløbsstrækninger med grundvandsindstrømning til vandløbet og tab af vandløbsvand til grundvandet. Således vil målinger af vandføringen langs vandløbet indikere, hvorvidt en vandløbsstrækning modtager eller taber vand til grundvandet.

5.1.2 Vurdering af strømningsforhold i vandløbsnære arealer med og uden vandindvinding

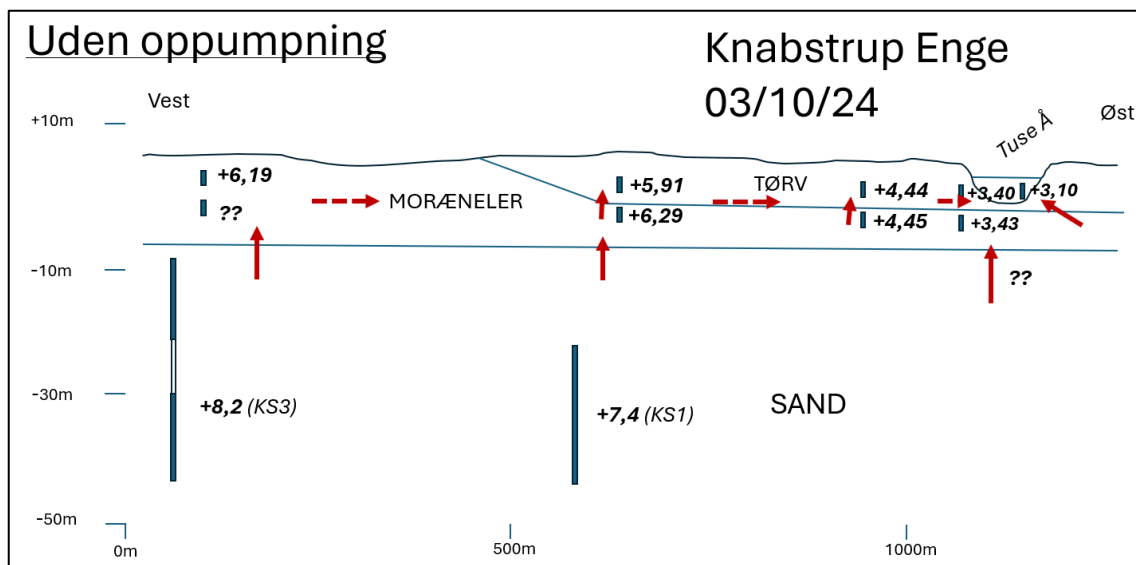
På Knabstrup Enge kildeplads er der etableret terrænnære boringer i de dæklag af moræner og tørveaflejringer over det kvartære grundvandsmagasin af smeltevandssand. De terrænnære boringer er placeret i 6 boringsreder med et øvre og et nedre filter i hver boringsrede til monitoring af vertikale gradienter i det terrænnære grundvand. Fra Tuse Å er trukket en øst-vest gående linje på 1000-1100 m længde igennem udvalgte terrænnære boringer og to af kildepladsens indvindingsboringer (KS1 og KS3) med det formål at vurdere strømningsforholdene i det terrænnære og regionale grundvand mellem kildepladsens boringer og vandløbet med og uden indvinding (Figur 9). Kildepladsen styres ved noget der kunne minde om den cyklisk indvinding skitseret i Figur 5 (nederst).



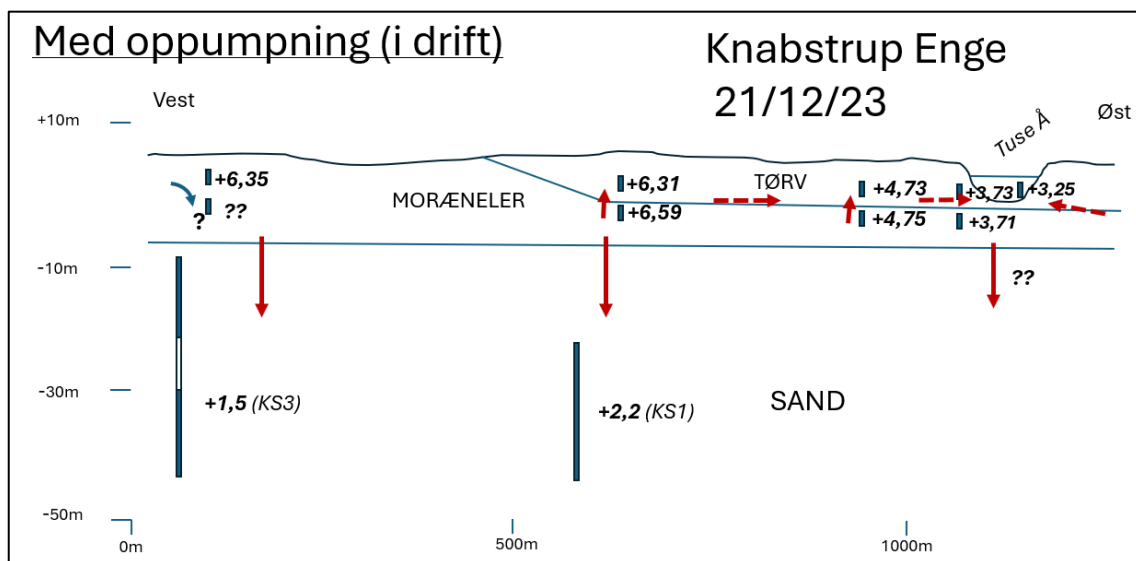
Figur 9. Boringsoversigt i vandløbsnære arealer mellem Knabstrup Enge kildeplads og Tuse Å. Øverst plan view af lokalitet og nederst de borer der indgår i transektet vist i Figur 10 og 11.

Til vurdering af strømningsforholdene i de vandløbsnære arealer med grundvandsindvinding (nærmeste 500-1000m fra Tuse Å) er vist strømningsretningen i det terrænnære og regionale grundvand i tværprofiler uden oppumpning (Figur 10) og med oppumpning (Figur 11). I perioder uden oppumpning viser vandstandsdata målt med automatiske vandstandsloggere, at der forekommer en betydelig opadrettet gradient fra det regionale grundvand mod terrænnære grundvand under hele kildepladsen. Dette gælder også i kontakten mellem grundvand og Tuse Å, hvor pejledata indikerer tilstrømning af terrænnær og regionalt grundvand til vandløbet på samme tid. I perioder med grundvandsindvinding viser målte pejlaserier at der fortsat er opadrettet hydraulisk gradient i det terrænnære grundvand, samtidig med at der er

nedadrettede gradientforhold i det regionale grundvandsmagasin. Det terrænnære grundvand strømmer horisontalt i retning mod Tuse Å (Figur 11). Bemærk de store forskelle på trykniveau i de to viste indvindingsboringer KS1 og KS3 er 5-7 m højere end under pumpning.



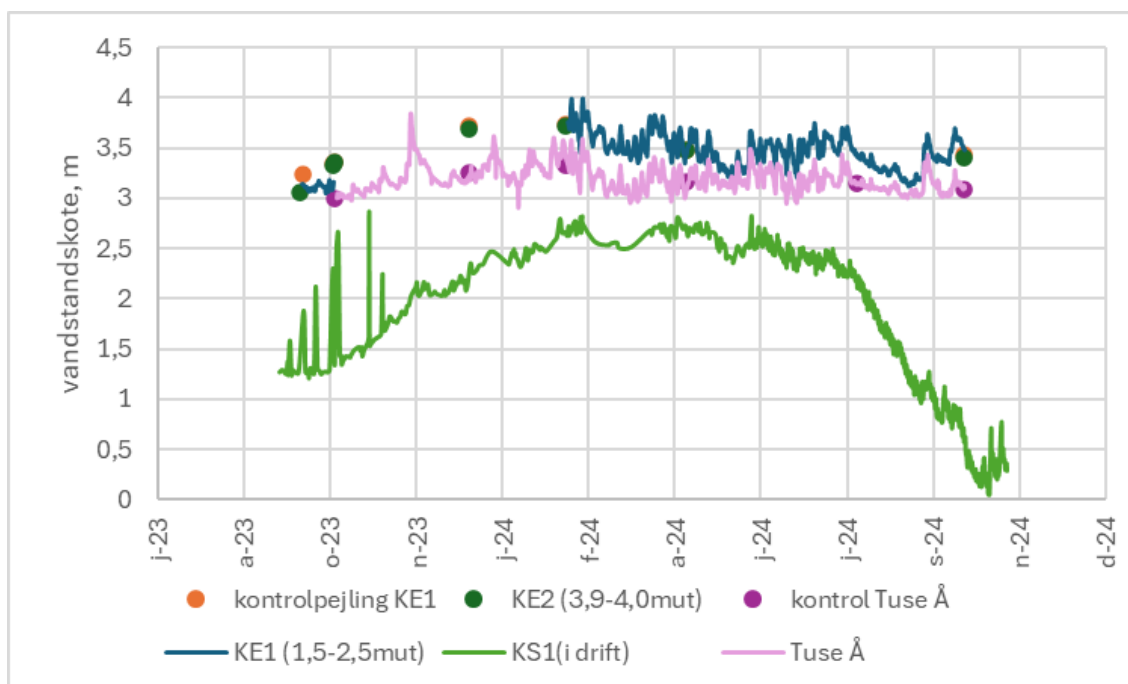
Figur 10. Strømningsveje i de vandløbsnære arealer af Knabstrup Enge kildepladsen uden oppumpning. Vandstandskoter den 21. december 2023. Opadrettede strømningsretning er vist med røde pile, horisontale strømninger med røde stiplede pile, og usikker nedadrettet strømning med blå pil. Boringes indtag er vist med blå lodrette firkanter.



Figur 11. Strømningsveje i terrænnær og regionalt grundvand Enge kildepladsen med oppumpning. Vandstandskoter den 21. december 2023. Opadrettede strømningsretning er vist med røde pile, horisontale strømninger med røde stiplede pile, og usikker nedadrettet strømning med blå pil. Boringes indtag er vist med blå lodrette firkanter.

Tilstrømningen af grundvand til vandløbet mindskes sandsynligvist i perioder med oppumpning men stopper ikke helt. Pejling af vandstand i de terrænnære borer ved Tuse å viser at der er hydraulisk kontakt mellem det terrænnære grundvand og vandløbet i hele måleperioden (Figur 12). Til vurdering af indvindingens påvirkning på trykniveauet i det regionale grundvandsmagasin under Tuse Å, er vandstandskoten i nærmeste indvindingsboring KS1

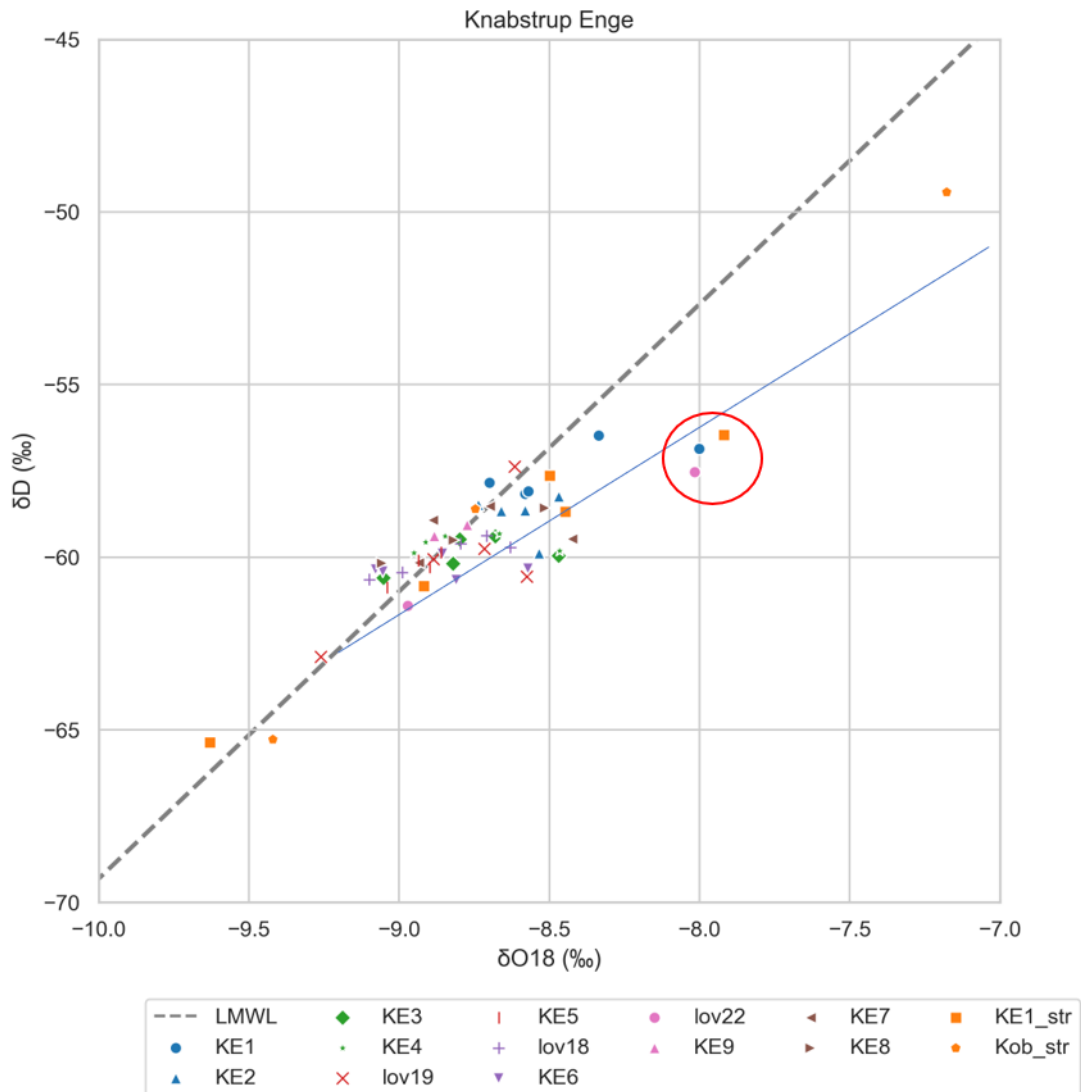
sammenstillet med vandstandskoter for vandløbsnær boring og vandstand i åen. Der benyttes data fra KS1, da der mangler et monitoringspunkt i det regionale grundvandsmagasin direkte under åen. Figur 12 viser, at der i det terrænnære dæklag, som består af moræneler, sandlinser og en mere udbredt tørveaflejring, er opadrettede gradient i forhold til vandstanden i åen. Således modtager åen terrænnært grundvand året rundt, uanset om der indvindes fra det regionale magasin. Det vides ikke om åen ligeledes modtager regionalt grundvand i perioder uden oppumpning. Nærværende undersøgelse kan ikke fastslå om indvindingen sænker trykniveauet i en grad, der ændrer blandingsforholdet mellem terrænnært og regionalt grundvand der strømmer til Tuse Å og dermed potentielt påvirker vandkemien i det tilstrømmende vand til GATØ i det vandløbsnære areal negativt.



Figur 12. Kontakten mellem terrænnært og regionalt grundvand nær Tuse Å med indvinding fra KS1 (i drift). DGUnr på boringer er 198.1244 (KE1); 198.1243 (KE2) og 197.443 (KS1).

Resultaterne fra iltisotopanalyserne for de etablerede boringer og vandløb er vist i Figur 13. Det ses en såkaldt LMWL (Local Meteoric Water Line), der baserer sig på isotopforholdet for indsamlet regnvand i Knabstrup Enge. Vand som er grundvandsdomineret forventes at ligge tæt op ad LMWL, mens vand der er undergået fordampning eller blevet opblandet vil ligge under LMWL. Der er estimeret en fordampningslinje markeret med blå for at repræsentere isotopforhold, der afspejler en grad af fordampning. Det er således tydeligt, at vandprøver fra DGUnr. 198.1244 (KE1), Tuse Å (KE1_str), og DGUnr. 197.764 (lov22) alle har et sammenligneligt isotopforhold (markeret med rød cirkel), som afspejler fordampning. Dette indikerer, at vandet i grundvandsboringen KE1 og lov22 er påvirket af overfladevand (som er repræsenteret ved KE1_str). Samtidig varierer isotopforholdet mere for nogle boringer, mens andre har et mere stabilt isotopforhold, der ligger tæt op ad LMWL. Det er interessant at KE1, der ligger relativt langt væk fra indvindingen, er påvirket af overfladevand. Om det er relateret til indvindingen, som viser ændringer i gradientforholdene under oppumpning (Figur 10 og 11) eller om det skyldes sæsonvariation, kan ikke afgøres med de indsamlede data. Med en

bedre tidlig opløsning vil det være muligt at relatere de målte isotopforhold til sæsonmæssige variationer såvel som eventuel påvirkning fra vandløbsnær indvinding.



Figur 13. Isotopforhold i vandprøver udtaget over tid i Tuse Å (KE1_str), Kobbø Å (KOB_str) og de etablerede borer. Se evt. figur 9 for lokaliteterne for de etablerede borer.

5.1.3 Opsummering (Knabstrup Enge)

- 1) Kan grundvandsindvindingen påvirke vandføring i vandløb?
 - I perioder med indvinding af grundvand på Knabstrup Enge kildepladsen har grundvandsindvindingen med nærmeste indvindingsboring (KS1) placeret ca. 500m fra åen tilsyneladende ingen påvist reduktion af vandføringen i hverken Tuse Å eller Kobbø Å i sommerperioden. Der er dog stor usikkerhed i vurderingen da vandføringen er målt under usikre omstændigheder i sommerperioden (baseflow) med kraftig grødevækst i begge vandløb.

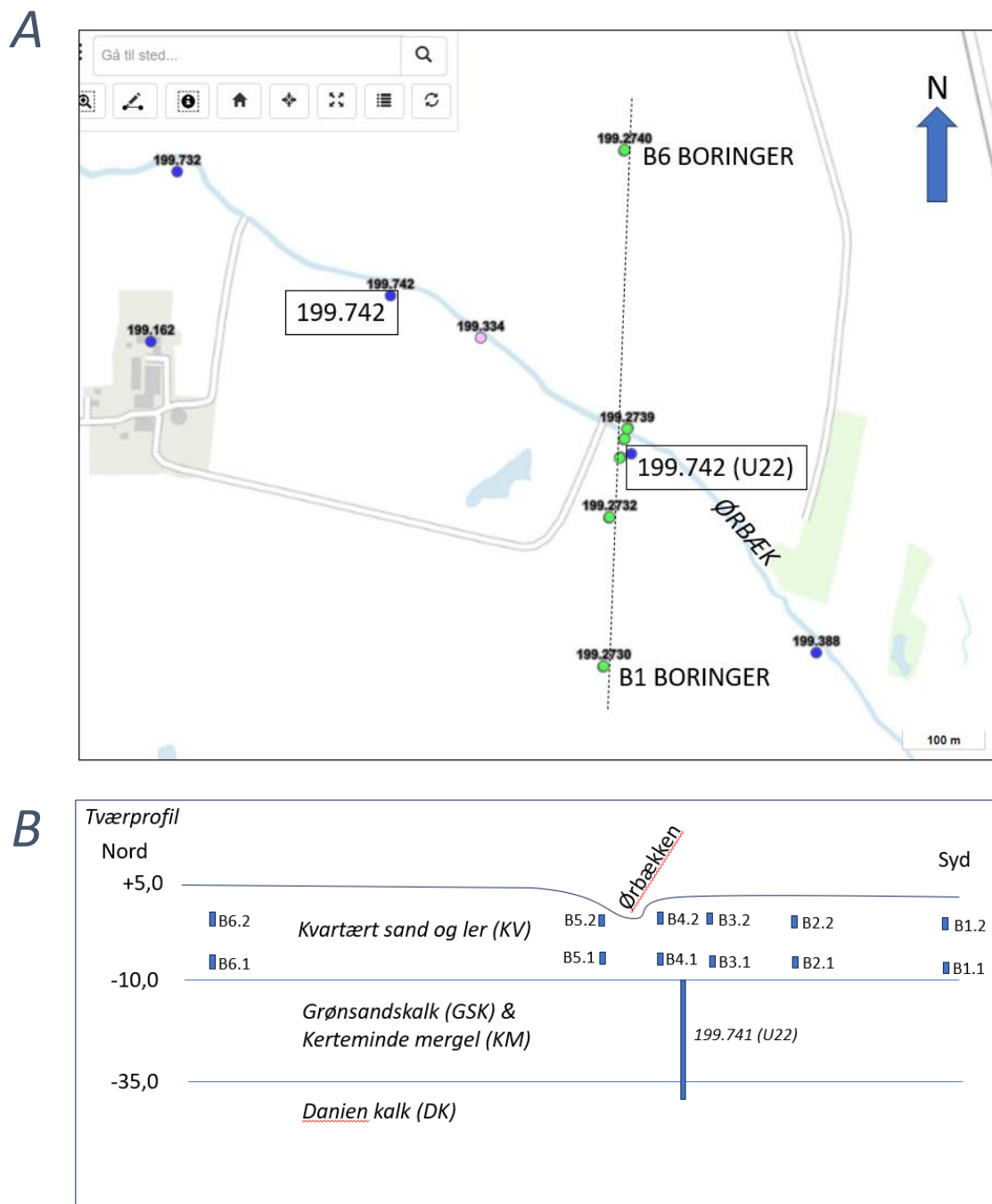
- Terrænnært grundvand er i kontakt med Tuse Å i perioder både med og uden indvinding fra kildepladsen (Figur 10 og 11).
 - Det er mest sandsynligt at ingen regional grundvand strømmer til Tuse Å under indvinding på kildepladsen. Der mangler et monitoringsindtag i det regionale grundvandsmagasin under Tuse Å til at monitorere sænkingskeglens udbredelse under vandløbet.
 - Stor opadrettet gradient i både terræn og regionalt grundvand i indvindingsoplandet i perioder uden oppumpning
- 2) *Negativ kvantitativ påvirkning fra vandindvinding af grundvandsafhængige terrestriske økosystemer (GATØ)?*
- Partnerskabsprojektet har ikke specifikt adresseret denne problemstilling.
 - Kvantitative tærskelværdier for vandindvindingens potentielle påvirkning af GATØ er ikke defineret for GATØ (Nilsson med flere, 2019)
 - Der findes ganske lidt viden om, hvor meget grundvandsindvindingen påvirker strømningsforholdene i lavbundslande (f.eks. ådalene), hvor den store udstrømning af grundvand finder sted til GATØ, vandløb og søer. To danske studier har vist en begrænset afsenkning af vandstanden i GATØ på lavbundslande (Johansen med flere, 2011; Kidmose og Nilsson, 2018).
- 3) *I hvilket omfang bidrager de vandløbsnære arealer og omgivelserne til grundvandsdannelse og dermed "nyt" grundvand til kildepladsen?*
- Lavbundsarealerne i Knabstrup Enge bidrager ikke til grundvandsdannelsen på kildepladsen.
 - Grundvandsdannelsen sker under omliggende landbrugsarealer til kildepladsen.
 - Tuse Å bidrager ikke til grundvandsdannelsen ved kildepladsen, da der er opadrettede gradientforhold året rundt.
 - Grundvandsbeskyttelsen skal fokuseres på omgivende arealer (ikke lavbundsarealerne).

5.2 Ørbæk kildepladsen

5.2.1 Anvendte metoder

Der er i maj 2024 etableret et nord-sydgående boringstransekt på 2 x 300m på kildepladsen på tværs af Ørbækken. Transektet skærer Ørbækken ved indvindingsboring 199.741 (Figur 14A). Et geologisk tværprofil med alle pejleboringer, der indgår i undersøgelsen, er vist i Figur 14B. Boringerne B1 – B6 består af et terrænnært indtag og et dybere indtag (i alt 12 indtag). I boringerne B1 til B6 er installeret automatiske vandstandsloggere, hvoraf 8 af de

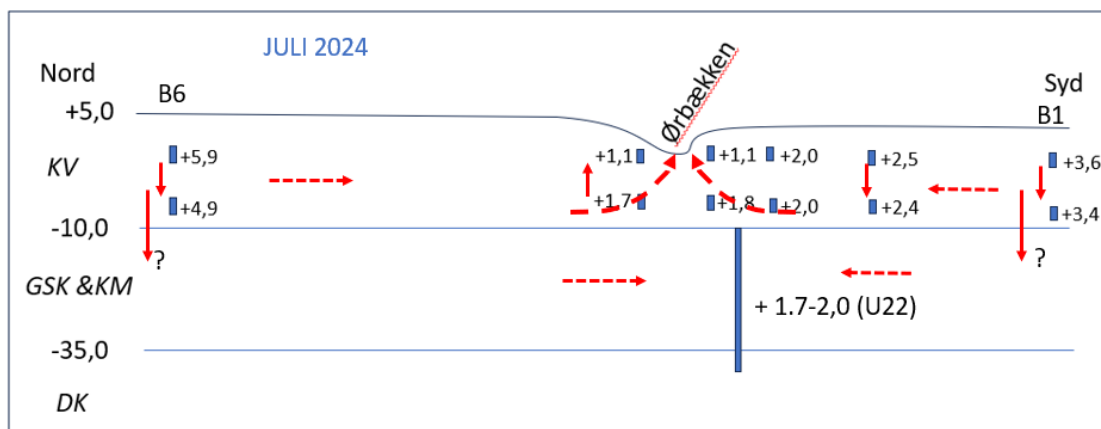
12 borerer sender online data til hjemmesiden <https://grundvandsstanden.dk/>. I dataanalysen indgår måledata for perioden 4. juli til 4. oktober 2024.



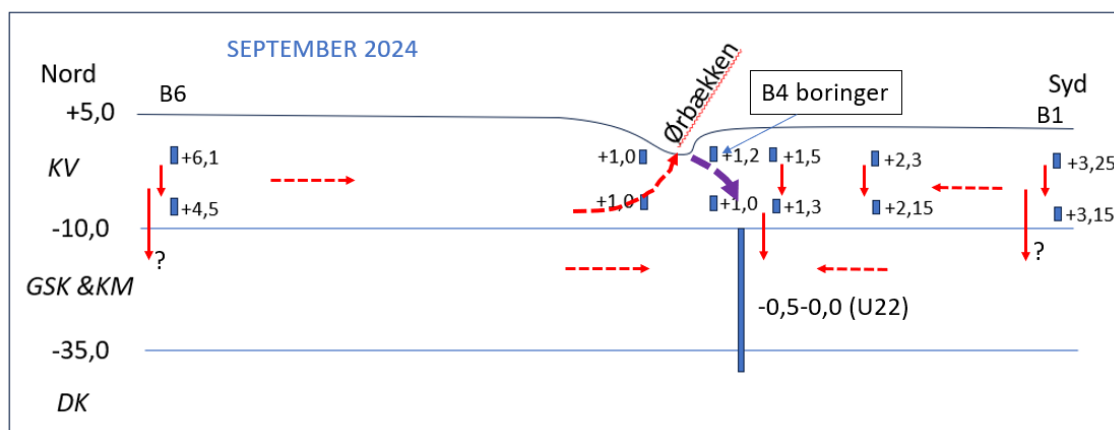
Figur 14. A: Boringstransekt på Ørbæk kildepladsen med pejleboringer i en afstand op til 300m på hver side af Ørbækken. B: Geologisk profil igennem Ørbæk kildeplads med borningsindtag der indgår i dataanalysen.

5.2.2 Vurdering af strømningsforhold i det vandløbsnære areal med og uden indvinding

Vandstandskoten for pejleboringerne er optegnet for to perioder i en 3 måneder lange måleperiode (15. juli – 14. oktober 2024). I Figur 15 er vist strømningsvejene i de kvartære aflejringer med terrænnært grundvand og regionalt grundvand i forskellige kalkaflejringer (grøn-sandskalk, Kerteminde mergel og bryozokalk) i starten af juli 2024 under oppumpning af grundvand ved en lavere ydelse. I størst afstand fra åen indikerer pejledata nedrettede strømningsforhold (nedadrettede gradientforhold) igennem de kvartære aflejringer, mens gradientforholdene i nærzonen under Ørbækken viser opadrettede strømningsveje, så grundvand samtidig potentielt vil strømme ind i vandløbet fra både det terrænnære og regionale grundvand. Strømningsvejene i kontakten mellem grundvand og vandløb ændres i starten af september 2024 til at være nedadrettet i en periode på mere end en måned (Figur 16). Undersøgelsen viser, at ændring i strømningsretningen mellem grundvand og vandløb forekommer i sommerperioden, men det er ukendt om tilsvarende ændringer også finder sted på andre tidspunkter af året, samt hvor længe disse perioder varer. Det anbefales derfor at fortsætte pejleserien til og med sommeren 2025.

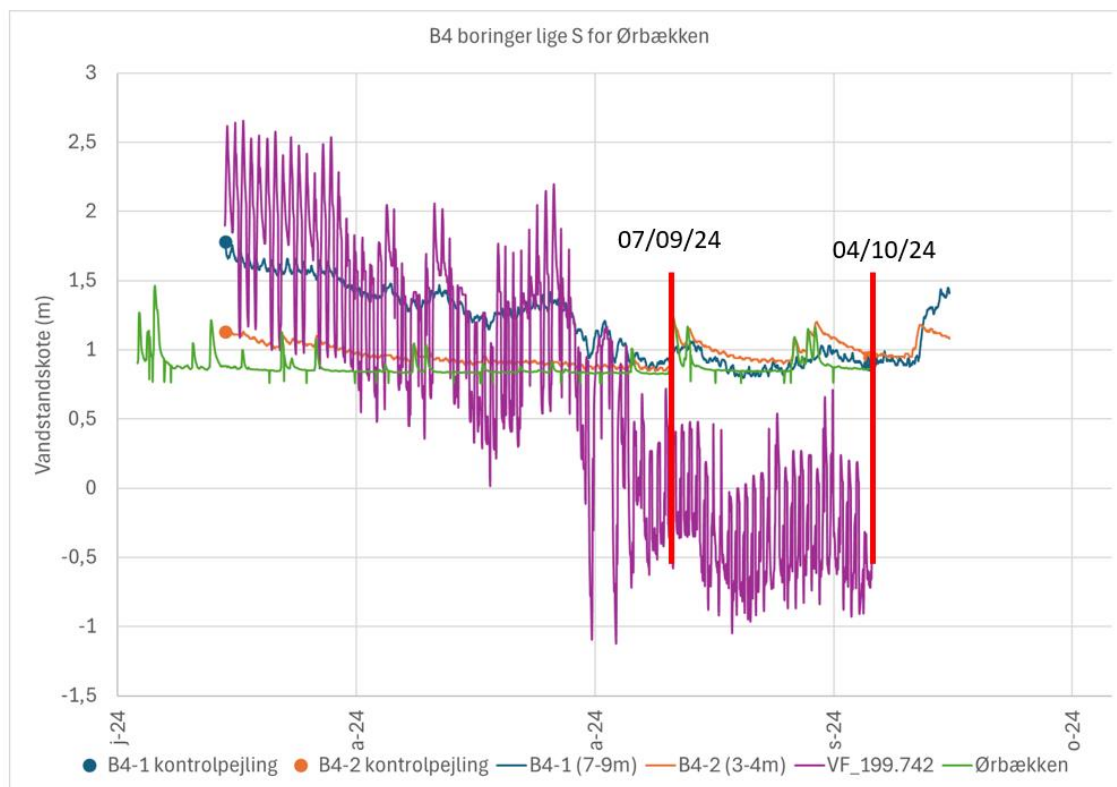


Figur 15. Strømningsveje i terrænnært grundvand i vandløbsnære arealer med grundvandsindvinding ved lavere ydelse i juli 2024. Opadrettede gradientforhold under Ørbækken giver grundvandstilstrømningen fra begge sider af Ørbækken til vandløbet som skitseret. Røde stiplede piler viser den horisontale strømning, Fuldt optrukne røde pile viser vertikale hydrauliske gradienter. Der mangler pejleboring i toppen af kalken i enderne af profilet. De blå lodrette kasser viser boringsindtag i profilet.

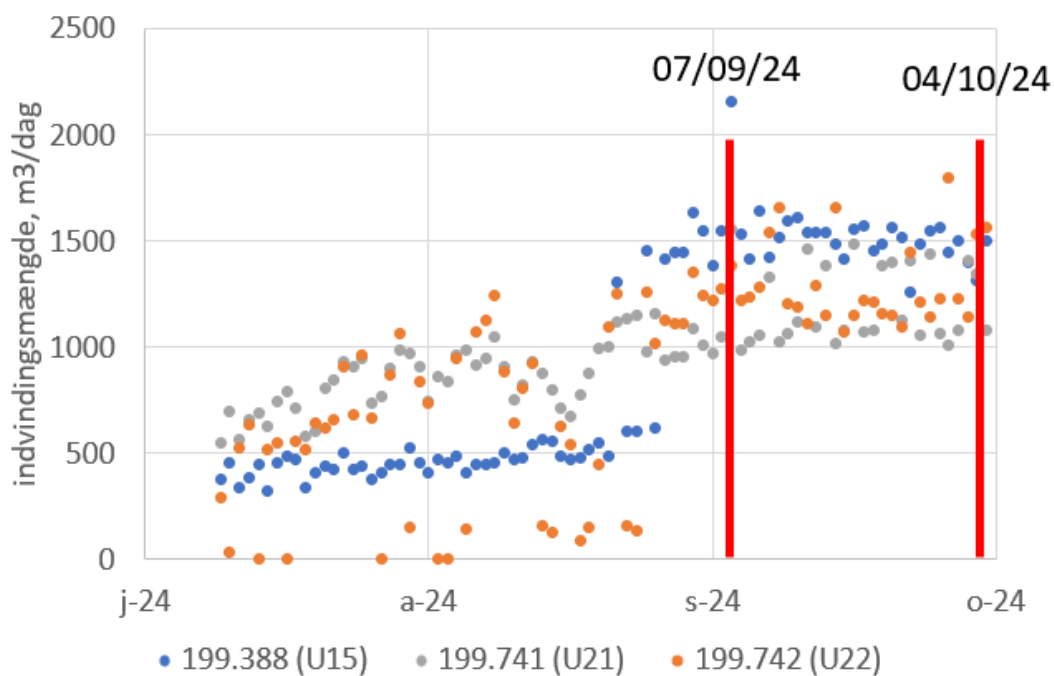


Figur 16. Hydrauliske gradienter og strømningsretning i de kvartære aflejringer og kalken (september 2024). Grundvandstilstrømningen til Ørbækken i vandløbets nordvendte side og potentielt tab af vandløbsvand til grundvandszonen (grøn pil) (antagelig til indvindingsboringen) i den sydlige side af vandløbsbunden. Røde stiplede piler viser den horisontale strømning, Fuldt optrukne røde pile viser vertikale hydrauliske gradienter. Lilla stiplet pil viser potentielt nedadrettede strømningsforhold i den sydlige side under vandløbet. Der mangler dog pejleboring i toppen af kalken i enderne af profilet. De blå lodrette kasser viser boringsindtag i profilet.

Grundvandets strømningsretning umiddelbart i kontakten mellem grundvand og Ørbækken er meget påvirkelig af, hvor meget der pumpes på indvindingsboringerne. Figur 17 viser for perioden juli til oktober 2024 en sammenstilling af vandstandskoter i Ørbækken, pejleboringer på sydsiden af Ørbækken i hhv. 3-4 m og 7-9 m dybde, samt nærmeste indvindingsboring med tilgængelige peyledata fra boringstransektet (199.742). Automatisk datalogning af vandstand i boring 199.741 (nærmeste indvindingsboring til transektet) virkede ikke i måleperioden. I starten af september 2024 falder vandstanden i indvindingsboringen (199.742) grundet en øget indvindingsydelse med det resultat gradienten mellem boring B4-1 (7-9 m) og B4-2 (3-4 m) vender og vandet under vandløbet strømmer nedefter og opblandes i første omgang med det terrænnære grundvand (Figur 18). Der ses en markant forøgelse af indvindingsmængden fra juli og august med daglige mængder på 500-1000 m³/dag til efterfølgende 1000 til over 1500 m³/dag. Det bemærkes, at indvindingen fra boringen 199.741 i transektet øges mindst af de tre indvindinger, så hvis transektet havde været placeret ved en af de to andre indvindingsboringer, anses det sandsynligt, at de nedadrettede gradient forhold er endnu mere udtalte end vist i Figur 17. Det vides ikke om nedsivningen af vandløbsvand også når det regionale grundvand med risiko for potentiel forurening af kildepladsens boring. Den viste sammenhæng mellem strømningsforhold i kontakten mellem grundvand og vandløb under varierende indvindingsmængder bekræfter den foreslåede konceptuelle forståelsesmodel for vandindvinding i vandløbsnære arealer. Resultaterne fra Ørbæk kildepladsen er desuden i overensstemmelse med en modelundersøgelse af grundvandsindvinding fra større kildepladser (eksempel Eksercermarken kildeplads i Odense), der viser, at indvinding skaber periodevis nedadrettede hydrauliske gradienter i områderne nær vandløbene i Odense området (Kidmose og Sonnenborg, 2018).



Figur 17 Grundvandsindvindings påvirkning af strømningsretningen mellem grundvand og vandløb.



Figur 18. Daglige Indvindingsmængder fra boring 199.388, 199.741 og 199.742 (nærmest transekt). Placering af boringer (se Figur 14A).

Ørbækken er en smal å med en vandløbsbredde på godt 1 m ved kildepladsen. Der er foretaget synkronmålinger af vandføringen i Ørbækken 14. maj og 2. august 2024 i hhv. 225 m og 35 m opstrøms boringstransektet; i boringstransektet ved boring B4 og B5, samt 100 m nedstrøms transektet. Vandføringsmålingerne i maj viser en tilvækst i vandføringer på tværs af kildepladsen fra 7 liter/sek. målt længst opstrøms boringstransektet stigende til 12 liter/sek. 100 m nedstrøms transektet. Målingen i august (baseflow) gav værdier på 1-3 liter/sek. er så lave at de nærmer sig instrumentets måleusikkerhed.

5.2.3 Delkonklusion (Ørbæk)

Samlet set viser dataanalysen fra Ørbæk kildepladsen, at der er overensstemmelse med de observerede strømningsforhold ved Ørbæk og den beskrevne konceptuelle model for strømningsveje i vandløbsnære arealer med grundvandsindvinding.

1) *Kan grundvandsindvindingens påvirke vandføring i vandløb?*

- Ja, grundvandsindvindingen ved Ørbæk har påvirket de hydrauliske gradient forhold og dermed strømningsretningen af grundvandet under Ørbækken i en periode på mere end en måned. Længden af perioden med nedadrettede gradientforhold er direkte korreleret til perioden med høje indvindingsmængder.
- Der skal opstilles en lokal grundvand- overfladevandsmodel til at belyse tærskelværdien for ved hvilken indvindingsmængde gradienten vender.
- Der foregår primært grundvandsudsivning fra det terrænnære grundvand til Ørbækken under indvinding ved lavere pumpeydeler.
- Synkronmålinger af vandføringer i starten af august 2024 laves i en periode, hvor der ikke indvindes vand ved så stor ydelse, at gradientforholdene er nedadrettede. Til gengæld viser den automatisk vandstandslogging i vandløbet tydeligt perioden, hvor der pumpes for hårdt, når vandstandsdata fra vandløbet kombineres med vandstandskoter i de nærmeste terrænnære boringer og vandindvindingsboringerne.
- Det er i vandløbshydrografen reelt meget vanskeligt at angive den dominerende årsag til reduktion i eventuel vandføring ved kildepladsen alene med måling af vandføring (jf. Barlow and Leake (2012)).

2) *Negativ kvantitativ påvirkning fra vandindvinding af grundvandsafhængige terrestriske økosystemer (GATØ)?*

- Partnerskabsprojektet har ikke haft specifikt fokus på denne problemstilling.
- Kvantitative tærskelværdier er ikke defineret for GATØ (Nilsson med flere, 2019).
- Nedadrettede gradientforhold, i det terrænnære grundvand i det vandløbsnære areal i planternes vækstsæson (april-september), vil potentielt have en negativ påvirkning på GATØ.

- Der mangler viden om hyppighed og varighed af perioden med nedadrettet gradient (tab af vandløbsvand til grundvandsmagasin) ved Ørbækken.
 - Grundet den korte observationsperiode kan vi ikke vurdere potentiel ændring af grundvandstilstrømningen til GATØ langs vandløbet under perioder med væsentlig påvirkning fra vandindvinding.
- 3) *I hvilket omfang bidrager de vandløbsnære arealer og omgivelserne til grundvandsdannelse og dermed "nyt" grundvand til kildepladsen?*
- Grundvandsdannelse sker indenfor kildepladsen i vandløbsnære arealer indtil mindst 300m afstand på hver side af Ørbækken.
 - I perioder med overudnyttelse af grundvandsserourcen, hvor gradienten vender, strømmer vand der falder på arealer syd for åen til vandløbet men forventes ikke at bidrage i væsentlig omfang til 'nyt grundvand' i kalkmagasinet. På andre kildepladser med højere vandføring vandløb kan det ikke udelukkes at vand fra vandløbet bidrager i et omfang så kildepladsens boringer forurenes med åvand.
 - Nærværende 100% af det grundvandsdannende areal har landbrug som arealanvendelse (forskellige afgrøder og kvæg).
 - Det kan ikke udelukkes at vandløbsvand fra Ørbækken i perioder tabes ved reduktion i vandføring til grundvandsmagasiner, hvorfra der indvindes grundvand. Nærværende undersøgelse har dog ikke kunne dokumentere dette forhold.
 - Der skal opstilles en lokal, integreret grundvand-vandløbsmodel til vurdering af en bæredygtig vandindvinding på kildepladsen. Yderligere kan risikoen for, at kildepladsen forurenes med vand direkte fra Ørbækken under perioder med for stor pumpeydelse, kvantificeres.
 - Grundvandsbeskyttelsen skal fokuseres på de vandløbsnære arealer samt landbrugsarealer i mindst 300m meters afstand på begge sider af Ørbækken med undtagelse af de helt vandløbsnære arealer så længe det ikke pumpes med for store ydelser på kildepladsen.
 - Den konceptuelle model er ikke afhængig af vandløbsbredden.
 - Det er sandsynligt der er en sammenhæng mellem indvindingsboringens afstand til vandløbet og indvindingsmængden. Jo tættere på vandløbet og jo større ydelse jo dybere er din sænkningstragt jo større er risikoen for gradienten bliver nedadrettet direkte under vandløbet. Vi kan ikke kvantificere "tipping point" for hvornår gradienten vender. Det kræver en lokal grundvand-overfladevandsmodel opstilles.

5.3 Generelle overvejelser ved opstilling af monitoringsprogram

For feltundersøgelserne ved Knabstrup Enge og Ørbækken er der taget udgangspunkt i princippet omkring transektmålinger. Det vil sige, at man langs et profil (transekt) på tværs af vandløbet laver et antal af boringer, her i to forskellige dybder, hvor man bl.a. overvåger variationen i grundvandsstanden og kan udtage vandprøver til kemiske analyser. Som belyst ovenfor er det muligt, ved at måle grundvandsstanden i overvågningsboringerne og sammenholde disse med vandstanden i vandløbet, at bestemme, hvornår grundvand strømmer ind i vandløbet og vice versa. Yderligere, vil ændringer i grundvandsstanden og vandstanden i vandløbet forårsaget af nærliggende grundvandsindvinding også kunne monitoreres i fald, at indvindingens udbredelse berører de anlagte overvågningsboringer.

Antallet af boringer må bero sig på de økonomiske rammer og undersøgelsens formål, dog er det afgørende:

- At etablere boringer i forskellige dybder ved samme lokalitet for at estimere om de hydrauliske gradienter skifter og vurdere om det evt. kan relateres til vandløbsnær grundvandsindvinding.
- At vandstanden i vandløbet monitoreres.
- At der også etableres en boring så tæt så muligt på vandløbet til at overvåge grundvandsstanden under vandløbet.

På baggrund af de præsenterede feltstudier vurderes det, at der så vidt muligt gøres brug af:

- Automatiske vandstandsloggere for at sikre, at variationen i grundvandsstanden kontinuert måles.
- Fast prøvetagningsfrekvens i fald at der indsamles vandprøver fra boringerne og nedbørsopsamler til stabile iltisotopanalyser.
- Oplysninger om grundvandsindvinding (mængder og automatisk loggede vandstand fra indvindingsboringen).
- Synkronmålinger af vandføringen i baseflow situationer. Dette for at vurdere, hvor vandløbet modtager eller taber vand til grundvandet og evt. påvirkning fra vandløbsnær grundvandsindvinding.

6. Perspektivering

En analyse af feltdata fra de to kildepladser Ørbæk og Knabstrup Enge viser at de konceptuelle principper udledt fra en fransk case også gælder de to kildepladser. Det bør bekræftes ved flere danske kildepladser med vandløbsnær vandindvinding at modellen også gælder disse.

Den konceptuelle model for vandløbsnær vandindvinding er baseret på viden fra en fransk case, hvor den franske flods bredde var op til 100m. Ingen danske vandløb er så brede som det franske eksempel, men nærværende undersøgelse viser, at den konceptuelle model også gør sig gældende for vandløb der er meget smallere end det franske eksempel. I Region Sjælland kan vandløbene inddeles i de to breddekategorier på henholdsvis 2-10 m (mellemstore vandløb) og < 2 m (mindre vandløb). Vandløbsbredden i Tuse å er 2-3,5 m mens Ørbækken kun er 1-1,5 m bred afhængig af årstid og nedbørshændelser. Vi konkluderer, at den konceptuelle model forståelse ikke kun gælder for meget brede franske floder, men også er gældende for vandløbsnære danske kildepladser med relativ lille vandløbsbredde. Umiddelbart ser det således ud til, at den konceptuelle model er uafhængig af vandløbsbredden, men det kan ikke udelukkes at vandløb med større vandføring er en risiko for forurening af kildepladsens borer med åvand, hvis der pumpes i sådan en grad, at gradienten vender, så åvand strømmer ned i grundvandszonen. Der er behov for mere erfaring fra flere kildepladser, hvor vandløbsnær vandindvinding er udbredt.

Det er adskillige hydrogeologiske faktorer (gradientforhold, anisotropifaktorer, mm.) og egenskaber (magasintykkelse, magasinforhold, mm.), der påvirker udbredelsen og ikke mindst estimeringen af vandløbsnær grundvandsindvinding og dermed påvirkningen på/vra vandløbssystemer. Denne påvirkning relaterer sig til grundvandstrømning såvel som stoftransport. I forbindelse med estimering af grundvandsdannende oplande og indvindingsoplande anvendes oftest numeriske hydrologiske modeller.

På baggrund af gennemgangen af konceptuel forståelse, hydrogeologiske faktorer, hydrologiske egenskaber og parameterbetydning for vandløbsnær grundvandsindvinding, fremgår det, at visse elementer med fordel kan benyttes og implementeres for at understøtte samt forbedre udpegningen af arealer med behov for grundvandbeskyttelse. En retvisende konceptuel forståelse på baggrund af lokale hydrogeologiske forhold er afgørende for at vurdere behovet for grundvandsbeskyttelse i forhold til kontaminering fra potentielt uønskede stoffer. Blandt andet viser gennemgangen, at ændringer i lokale hydrauliske gradienter kan have indvirkning på arealer, som udgør grundvandsdannende oplande. Samtidig er der gennemgået forskellige hydrauliske parameter, der har betydning for udbredelsen fra grundvandsindvinding i tid og rum. Disse parametre, såvel som de tidslige ændringer i hydrauliske gradienter, må formodes at variere rummeligt og kan derfor ikke forventes at være repræsenteret i tilstrækkelig grad i regionale numeriske modeller. Derfor vil der ved anvendelsen af numeriske modeller til at estimere påvirkningen fra vandløbsnær indvinding være behov for at sikre, at lokale forhold indarbejdes. I forhold til implementeringen af den lokale viden i de numeriske modeller påvirker blandt andet cellediskretiseringen simuleringen af udvekslingen mellem grundvand og overfladevand. Valget af cellediskretisering vil således påvirke grundvandsfluxen, der er afgørende for simulering af stoftransport.

Det er vigtigt at bemærke, at regionale numeriske modeller typisk er lavet på baggrund af allerede indsamlet data, der ikke nødvendigvis er repræsentative for en eller flere lokale indvindingsboringer og tilstødende vandløb. For at bestemme adskillelige af de heri fremhævede hydrogeologiske parametre og faktorer kræves det, at der udføres lokale undersøgelser. Eksempelvis er diffusiviteten afgørende for udbredelsen og påvirkningen af vandløbsnær grundvandsindvinding (figur 5), hvorfor det ville være hensigtsmæssigt at bestemme lokale parametre (magasintykkelse, hydrauliske ledningsevne, og magasintal) for diffusiviteten i det relevante undersøgelsesområde og indarbejde disse i de numeriske modeller. Yderligere viser den udførte dataanalyse blandt andet, at lokale gradientforhold og ændringer i disse samt strømningsveje relativt nemt kan belyses ved anvendelse af forholdsvis simple målinger. For at udnytte de udførte målinger i numeriske modeller (eksempelvis i forhold til kalibrering), er der dog behov for at videreføre tidsserierne.

7. Konklusioner og anbefalinger

Konklusioner

Denne vidensopsamling har undersøgt strømningsforhold i vandløbsnære arealer med grundvandsindvinding med henblik på at identificere de styrende hydrogeologiske egenskaber, der er afgørende for at estimere områder med behov for grundvandsbeskyttelse, eksempelvis mod næringsstoffer og pesticider. De fremhævede eksempler i vidensopsamlingen viser, at der med fordel kan indhentes og indarbejdes lokale data til at forbedre udpegningen af områder med behov for grundvandsbeskyttelse.

Undersøgelsen af to kildepladser, Knabstrup Enge og Ørbæk, bekræfter i stor udstrækning den konceptuelle model, der forudsiger, at vandløbsnær grundvandsindvinding kan påvirke strømningsveje og forårsage opblanding af grundvand med potentielt forurenat vandløbsvand.

I begge feltundersøgelser er etableret boringstransekt vinkelret på vandløbet på de to kildepladser hvor boringsindtag er etableret i to dybder i boringsreder med forskellig afstand fra vandløbet, så strømningsforholdene kan følges i de terrænnære aflejringer (med og uden vandindvinding). Der er installeret automatiske vandstandsloggere så trykgradienterne til monitoring af vandstand/trykniveau i de vandløbsnære arealer. Det anbefales at indsamle vandstandsdata i minimum et år.

I Ørbæk observeredes ændringer i de hydrauliske gradientforhold og strømningsretningen under Ørbækken i perioder med indvinding. Derudover indikerer data en mulig strømning af både terrænnært og regionalt grundvand til Ørbækken under indvinding med lavere ydelse.

I Knabstrup Enge fandtes ingen signifikant reduktion af vandføringen i Tuse Å og Kobbe Å under indvinding i sommerperioden. Der er dog sikker kontakt mellem terrænnært grundvand og Tuse Å, mens det ikke er endeligt afklaret, om regionalt grundvand også er i kontakt med vandløbet i perioder med vandindvinding.

Ofte ligger vandløbsnære grundvandsindvindinger på (kulstofrige) lavbundslande langs vandløbene. Under lavbundslandene vil der generelt ikke ske grundvandsdannelse grundet opadrettede gradient forhold. Grundvandsdannelsen sker typisk under de tilstødende vandløbsnære arealer.

Anbefalinger

For at forbedre forståelsen af og beskyttelsen af grundvandet i vandløbsnære områder anbefales følgende værktøjer og metodikker. I feltundersøgelser anbefales:

- **Kortlægning af strømningsveje:** Der bør foretages en detaljeret kortlægning af strømningsvejene i den ripariske zone, med fokus på de hurtige strømningsveje (Q2-Q4). Denne viden kan bruges til at vurdere, hvilke områder der har størst behov for beskyttelse. På de to kildepladser, Knabstrup Enge og Ørbækken var det muligt med relative simple installationer og målinger at udlede påvirkningen af vandløbsnær grundvandsindvinding. Det anbefales at etablere grundvandsboringer i to dybder langs et transekt for at måle tidsserier af de hydrauliske trykniveauer. Formålet er at

vurdere, om der sker ændringer i den hydrauliske gradient og dermed ændringer i strømningsretningen, som følge af vandløbsnær grundvandsindvinding. Yderligere bør der også indgå tidsseriemålinger af vandstanden i relevante vandløb langs transektet. For at vurdere om vandløbet modtager/tabber vand anbefales det også at etablere en grundvandmoniteringsboring under vandløbet for at måle tidsserier af de hydrauliske trykniveauer.

Det anbefales at tage regelmæssige vandprøver fra de etablerede boringer, vandløbet, og indvindingsboringer for at analysere stabile iltisotoper. Variationer i isotopforholdene kan anvendes til at udlede information i strømningsveje og opblanding mellem grundvand og overfladevand.

- **Udlede lokale hydrologiske parametre:** Den allestedsnærværende heterogenitet fordrer at lokale variationer i hydrologiske egenskaber forsøges bestemt, så vidt det er muligt. Således anbefales det at udføre slug test og eller pumpe test for at estimere og vurdere lokale variationer i transmisivitet og magasintal. Disse vil kunne implementeres direkte i numeriske modeller, bl.a. som indledende parameter værdier, i en modelkalibrering.
- **Bestemmelse af lokale hydrogeologiske variationer:** Magasinmægtigheder er varierer rummeligt og har stor betydning for udbredelsen af grundvandsdannende oplande såvel som indvindingsoplande. Derfor anbefales det at magasinmægtighederne estimeres inden for et givent undersøgelsesområde. Til formålet kunne etableres lokale boringer og anvendes geofysiske målinger.

I numeriske model analyser anbefales:

- **Implementering af lokal viden i modeller:** Regionale numeriske modeller bør modificeres til at afspejle lokale forhold. Det gælder især anisotropiforhold, magasinmægtigheder, magasintal og den rummelige variation i hydraulisk ledningsevne. Det anbefales, at målingerne af trykniveauerne fra etablerede transekter indgår i kvalificeringen af numeriske modeller. Anisotropiforhold estimeres via parameter kalibrering.
- **Finere cellediskretisering:** Modelsimuleringer bør udføres med en finere cellediskretisering i områder af særlig interesse. Det forbedrer nøjagtigheden af partikelbanesimuleringerne og derved de simulerede oplande. Yderligere giver finere cellediskretisering et mere præcist billede af udvekslingen mellem grundvand og vandløb, hvor bl.a. vandløb- og drænarealer kan specificeres mere nøjagtigt.
- **Hensyn til tidsvariationer:** Ved partikelbanesimuleringer i transiente modeller bør der tages hensyn til variationen i strømningsmønsteret over tid. Partikler bør frigives ved alle stressperioder for at sikre en korrekt afgrænsning af oplandene.

Yderligere anbefalinger til de etablerede feltlokaliteter:

- **Etablering af monitoringsboringer i det regionale grundvandsmagasin:** Der bør i Knabstrup Enge etableres en monitoringsboring i det regionale sand grundvandsmagasin under Tuse Å for at dokumentere gradientforholdene og afgøre, om der er kontakt mellem regionalt grundvand og vandløbet under indvinding.

- **Fortsatte målinger:** Pejleserier og vandføringsmålinger bør fortsættes over flere sæsoner for at få et mere detaljeret billede af de sæsonmæssige variationer i strømningsforholdene. Dette er vigtigt, da eventuel påvirkning fra vandløbsnær grundvandsindvinding på et nærliggende vandløb vil variere afhængigt af de lokale hydrauliske egenskaber og indvindingsrater.

Ved at implementere disse anbefalinger kan man opnå en forbedret forståelse af strømningsvejene og informationsgrundlag for at sikre en mere bæredygtig forvaltning af grundvandsressourcen i vandløbsnære områder.

Det anbefales at der på Ørbæk lokaliteten laves vandføringsmålinger et antal gange i det kommende år så gradient forhold kan sammenholdes med vandføring. Det ville være værdifuldt at have iltisotop data, svarende til Knabstrup Enge, til at vurdere strømningsforholdene, i særligt perioder med flow reversals. Ikke desto mindre er der på baggrund af de foreløbige data indikationer for, at der kan være perioder, hvor vandløbsvand potentielt tabes til grundvandszonen ved kildepladsen.

8. Referencer

Anderson M P, Woessner WW, Hunt RJ (2015). Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press.

Barlow PM, Leake SA (2012). *Streamflow depletion by wells--Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow* (No. Circular 1376). U.S. Geological Survey. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/circ/1376/>

Barlow PM, Leake SA, Fienen MN (2018). Capture versus capture zones: Clarifying terminology related to sources of water to wells. *Groundwater*, 56(5), 694-704.

Bernard-Jannin L, Sun X, Teissier S, Sauvage S, Sánchez-Pérez JM (2017). Spatio-temporal analysis of factors controlling nitrate dynamics and potential denitrification hot spots and hot moments in groundwater of an alluvial floodplain. *Ecol. Eng.* 2017, 103, 372–384.

Boico VF, Therrien R, Delottier H, Young NL, Højberg AL (2022). Comparing alternative conceptual models for tile drains and soil heterogeneity for the simulation of tile drainage in agricultural catchments. *Journal of Hydrology*, 612, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128120>.

Dahl M, Nilsson B, Langhoff J, Refsgaard JC (2007). Review of classification systems and new multi-scale typology of groundwater – surface water interaction. *Journal of Hydrology* 344, 1–16.

De Schepper G, Therrien R, Refsgaard JC, He X, Kjaergaard C, Iversen BV (2017). Simulating seasonal variations of tile drainage discharge in an agricultural catchment. *Water Resources Research*, 53, 3896-3920, <https://doi.org/10.1002/2016wr020209>.

Duque C, Nilsson B, Engesgaard P (2023). Groundwater–surface water interaction in Denmark. *WIREs Water*.2023;10:e1664, DOI:10.1002/wat2.1664.

EA (2019) Manual for the production of groundwater source protection zones. March 2019. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/822402/Manual-for-the-production-of-Groundwater-Source-Protection-Zones.pdf

Grøn Trepert (2024). [Ministeriet for Grøn Trepert](#)

Hansen AL, Storgaard A, He X, Højberg AL, Refsgaard JC, Iversen BV, Kjaergaard C (2019). Importance of geological information for assessing drain flow in a Danish till landscape. *Hydrological Processes* 33 (3), 450–462.

Henriksen HJ, Trolborg L, Sonnenborg T, Højberg AL, Stisen S, Kidmose JB, Refsgaard JC (2017). Hydrologisk geovejledning. God praksis i hydrologisk modellering. Geovejledning 2017/1.

Henriksen HJ, Trolborg L, Nyegaard P, Sonnenborg TO, Refsgaard JC, Madsen B (2003). Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *J Hydrol*, 280:52–71. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00186-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00186-0)

Johansen OM, Pedersen ML, Jensen JB (2011). Effect of groundwater abstraction on fen ecosystems. *Journal of Hydrology*, 402(3–4), 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.031>

Karan S, Engesgaard P, Looms MC, Laier T, Kazmierczak J (2013). Groundwater flow and mixing in a wetland–stream system: Field study and numerical modeling. *Journal of hydrology*, 488, 73–83.

Karan S, Jacobsen M, Kazmierczak J, Reyna-Gutiérrez JA, Breum T, Engesgaard P (2021). Numerical representation of groundwater-surface water exchange and the effect on stream-flow contribution estimates. *Water (Switzerland)*, 13(14), 1–13. <https://doi.org/10.3390/w13141923>

Kidmose J, Nilsson B (2017). Grundvands- og overfladevandsmodel for Vasby Mose og Sengeløse Mose, Høje-taastrup kommune. GEUS rapport nr. 1.

Kidmose J, Sonnenborg TO (2018). Fælles grundvand – Fælles ansvar: WP2 Hydrologisk model. GEUS rapport 2018/33.

Killian CD, Asquith WH, Barlow JRB, Bent GC, Kress WH, Barlow PM, Schmitz DW (2019). Characterizing groundwater and surface-water interaction using hydrograph-separation techniques and groundwater-level data throughout the Mississippi Delta, USA *Hydrogeology Journal*, DOI10.1007/s10040-019-01981-6

Krabbenhoft DP, Bowser CJ, Anderson MP, Valley JW (1990). Estimating groundwater exchange with lakes: 1. The stable isotope mass balance method. *Water Resources Research*, 26(10), 2445–2453.

Malama B, Pritchard-Peterson D, Jasbinsek JJ, Surfleet C (2021). Assessing stream-aquifer connectivity in a coastal California watershed. *Water* 2021, 13, 416.

Miljøstyrelsen (2018). Kvalitetssikring af oplandsafgrænsning Version. Notat dateret 20-08-2028 [kvalitetssikring-af-oplandsafgrænsning-version-1 .pdf \(mst.dk\)](https://mst.dk/kvalitetssikring-af-oplandsafgrænsning-version-1.pdf).

Modica E, Reilly TE, Pollack DW (1997). Patterns and age distribution of groundwater flow to streams. *Ground Water*, 35, 523–537

Nilsson B, Engesgaard P, Kidmose J, Karan S, Looms MC, Frandsen MCS (2009). Water budget of Skærsø, a lake in south-east Jylland, Denmark: exchange between groundwater and lake water. *GEUS Bulletin*, 17, 45–48.

Nilsson B, Li F, Chen H, Sebok E, Henriksen HJ (2022). Evidence of karstification in chalk and limestone aquifers connected with stream systems and possible relation with the fish ecological quality ratio in Denmark. *Hydrogeology Journal*, <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02565-7>.

Ranalli AJ, Macalady DL (2010). The importance of the riparian zone and in-stream processes in nitrate attenuation in undisturbed and agricultural watersheds-A review of the scientific literature. *J. Hydrol.* 2010, 389, 406–415.

Rayne TW, Bradbury KR, Zheng C (2014). Correct delineation of capture zones using particle tracking under transient conditions. *Ground Water*, 52(3).

Refsgaard JC, Hansen E (1982). A distributed groundwater/surface water model for the Suså-catchment. Part II—Simulations of streamflow depletions due to groundwater abstraction. *Nordic Hydrology*, 13, 311–322. <https://doi.org/10.2166/nh.1982.0026>

Sebok E, Karan S, Engesgaard P (2018). Using hydrogeophysical methods to assess the feasibility of lake bank filtration. *Journal of Hydrology*, 562, 423-434.

Seidenfaden IK, He X, Hansen AL, Iversen BV, Højberg AL (2024). Can local drain flow measurements be utilized to improve catchment scale modelling ?. *Journal of Hydrology*, X22, 100170, <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2023.100170>.

Sechu GL, Nilsson B, Iversen BV, Møller AB, Greve MB, Trolborg L, Greve MH (2022). Mapping groundwater-surface water interactions on a national scale for the stream network in Denmark. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 40 (2022) 101015, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101015>

Sonnenborg TO, Henriksen HJ (2005). *Håndbog i grundvandsmodellering*, GEUS, 2005.
Stisen S, Ondracek M, Trolborg L, Schneider RJM., van Til MJ (2019). National Vandresource Model. Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019. Danmarks Og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport, 31.

Stisen S, Ondraczek M, Trolborg L, Schneider RJM, van Till MJ (2019). National Vandresource Model. Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019. GEUS Rapport 2019/31.

Texier J, Goncaives J, Riviere A (2022). Numerical assessment of groundwater flowpaths below a streambed in alluvial plains impacted by a pumping field, *water*, 14, doi.org/10.3390/w14071100

Tiemeyer B, Lennartz B, Kahle P (2008). Analysing nitrate losses from an artificially drained lowland catchment (North-Eastern Germany) with a mixing model. *Agriculture Ecosystems & Environment* 123 (1–3), 125–136.

Toth J (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of geophysical research*, 68(16), 4795-4812.

Winter TC, Harvey JW, Franke OL, Alley WM (1998). *Ground Water and Surface Water-A Single Resource-U.S. Geological Survey Circular 1139*; U.S. Geological Survey, Water Resources Division: Reston, VA: USA, 1998;

Zipper S, Brookfield A, Ajami H, Ayers JR, Beightel C, Fienen MN, med flere (2024). Stream-flow depletion caused by groundwater pumping: Fundamental research priorities for

management relevant science. *Water Resources Research*, 60, e2023WR035727.
<https://doi.org/10.1029/2023WR035727>

Bilag 1: Knabstrup Enge - Beskrivelse af geologiske lag

Geologisk beskrivelse af håndboringer

Ordliste

KH = kalkholdig
KF = kalkfri
sv. = svag
st. = stærk
st. = stedvis
omd. = omdannet
pl. = planterester
org. mat. = organisk materiale
VSP = vandspejl
ML = moræneler
SS eller DS = smeltevandssand
M = morænesand
DL = smeltevandsler
DI = smeltevandssilt
TS = ferskvandssand
TI = ferskvandssilt
TL = ferskvandsler

Håndboring HB-KE1 (ved boring KE1 (DGUnr 198.1243) med filter 150-250cm u. terræn)

UTM koordinator: 661829,19; 6173783,00; Terrænkote: + 3,87/DVR90

Dato: 13/9-2023

(cm)

0-25 TØRV, st. omd., rig på planterester, mørk gulbrun, KF

25-55 TØRV, st. siltet, st. omd., mørk gulbrun, KF

55-75 do, slirer af sand og silt, KH

65 VSP

75-100 SAND, mellem og groft sand, lys gulbrun, ekstrem KH (kildekalk)

100-140 Org. GYTJE, st. KH

140-170 SAND, fint og mellem, siltet og leret, olivengrå, KH

170-230 SAND, fint, st. siltet, olivengrå, KH

230-250 SAND, fint, st. siltet og leret, olivengrå, enkelte bryozoer, KH

250-270 SAND, mest fint, siltet, olivengrå, klaster af kalksandkalk, rig på bryzoer, KH
270-300 SAND, mellem og groft, sv. gruset, olivengrå, bryzoer, KH (smeltevandssand)

**Håndboring HB-KE3 (ved boring KE3 (DGUnr 197.801) med filter 260-360cm u. terræn)
– ved regnmåler**

UTM koordinator: 661627,60; 6173824,39; Terrænkote: + 4,67/DVR90

Dato: 13/9-2023

(cm)

0-60 TØRV, st. omd., siltet og sandet, mørk gulbrun, KF

60-320 SILT, rig på org. Materiale, sort-brun, ekstrem kalkholdig, kalk udfældet (prøvepose nr. 88400) (kildekalk)

100-140 fugtigt (ingen VSP)

320-380 SAND, mest fint, st. siltet, rig på org. Mat., mørk gråbrun, stv. KH (post glacial aflejring)

Håndboring HB-KE5 (ved boring KE5 (DGUnr 197.803) (4m ¾" jernrør) med filter 390-400 cm u. terræn og boring 19 filter 0-200 cm u terræn))

UTM koordinator: 661198,32; 6173878,54; Terrænkote: + 6,57/DVR90

Dato: 13/9-2023

(cm)

0-15 TØRV, st. omd., siltet og sandetr, mørk gulbrun, KF

15-25 KILDEKALK ?, st. KH

25-60 TØRV, st. omd., st. siltet, sortbrun, rig på org. Mat., KH

60-170 ORG. GYTJE, striber af kildekalk, KH

100 VSP

170-230 SAND, fint og mellem, få grus korn, enkelte bryzoer, sv/stv. KH (glacialt sand)

Håndboring HB-KE6 (ved boring KE6 (DGUnr 197.804) (4m ¾" jernrør) med filter 390-400 cm u. terræn og boring 18 filter 0-200 cm u terræn))

UTM koordinator: 661245,80; 6173611,64; Terrænkote: + 6,05/DVR90

Dato: 14/9-2023

(cm)

0-50 TØRV, st. omd., st. sandet og siltet, mørk gulbrun, KH

50-100 TØRV, st. omd., st. siltet, sort brun-mørk rødbrun, stv. KH

90 VSP

100-125 SAND, fint, sv. siltet, gråbrun, sv. KH

125-150 do, KH

150-175 SAND, fint, st. siltet, gråbrun, KH

175-185 LER, st. siltet og sandet, KH (søaflejring)

185-240 LER, siltet, enkelte gruskorn, olivengrå, st. KH (ML)

Håndboring HB-KE7 (ved boring KE7 (DGUnr 197.805) med 50mm plastrør og filter i 250-350 cm u. terræn i håndboring HB-KE7) (ved siden af ny boring KE8 med 5m ¾" jernrør med filter 490-500 cm u. terræn)

UTM koordinator: 660545,95; 6174162,57; Terrænkote: + 7,85/DVR90

Dato: 14/9-2023

(cm)

0-30 TØRV, st. omd., siltet og sandet, mørk gulbrun, stv. KH

30-75 do, KF (fyld ?)

75-250 LER, st. siltet og sandet, lys olivenbrun (oxideret), st. KH (ML)

250-370 do, oliven grå (reduceret)

340 fugtigt (ikke VSP)