



VUDP PROJEKTRAPPORT

TERNÆRT VAND – INTERAKTION MELLEM AFLØBSSYSTEM OG TERRÆNNÆRT VAND FRA OVEN, NEDEN OG SIDEN.



TERNÆRT VAND VUDP-FORENINGEN PROJEKTRAPPORT

DATO: 29/01/2026

Projekt ID: 2022.34

Udgiver:

Aarhus Vand A/S

Udarbejdet af:

Claes, N.⁽¹⁾, Kempel, B.⁽¹⁾, Thorndahl, S. L. ⁽²⁾, Møldrup, P.⁽²⁾, Vilhelmsen, T.N.⁽³⁾, van't Veen, K.M.⁽³⁾, Simonsen, P.D.⁽³⁾, Ploug, S.B.⁽³⁾, og Christensen, N.K.⁽⁴⁾

- (1.) Aarhus Vand A/S
- (2.) Aalborg Universitet
- (3.) NIRAS A/S
- (4.) Aarhus Kommune

Finansiering:

Vejledningen er finansieret af
VUDP-Foreningen, Vandsektorens forening til forbedring af vandsektorens effektivitet og kvalitet

Samarbejdspartnere:

Aarhus Vand A/S, Aalborg Universitet, NIRAS A/S, Aarhus Kommune



Indholdsfortegnelse

Sammenfatning	3
English summary	4
Introduktion	5
Projektets betydning for vandbranchen	8
Marked og/eller anvendelsesmuligheder	10
Næste skridt	11
Formidling	13
Formål	15
Output	16
Projektresultater	18
Målelokalitet	18
Laboratorieforsøg	20
Analyse af måledata	26
Modellering af jordprofiler	30
Opskalering til oplandsskala	34
Tidsserieanalyse af terrænnært grundvand	42
Konklusion	50
Litteraturliste	52
Bilag	53
Grundvandspejlinger og lokalgeologi	53

Sammenfatning

Afløbssystemer i mange byer belastes utilsigtet af grundvand, der trænger ind gennem beskadigede eller utætte rør, samt af grundvand fra oplandets afløbssystemer. Med de kommende klimaforandringer forventes problemet at blive værre, især i byer med lavtliggende grundvandsspejl. For at løse problemet kræves en omfattende kortlægning, som indebærer forståelse af grundvandsspejlets placering og dynamik, jordtyper og -egenskaber samt tilstanden af dræninfrastrukturen. Det er vigtigt at belyse, analysere og forstå de styrende processer, for at kunne håndtere nuværende og kommende udfordringer med det terrænnære grundvand i disse byzoner.

Overvågning på et forsøgsområde i Beder, Aarhus viser stor variation i det lave grundvandsspejl forårsaget af kapillærkræfter i jorden. Disse kapillærkræfter medfører betydelige stigninger i grundvandsniveauet efter regnhændelser. Grundvandsniveauet observeres at stige ti gange i forhold til regnmængden – for eksempel en stigning på 50 cm i vandstanden som reaktion på 50 mm regn. Områder, hvor afløbssystemet er placeret vertikalt i denne dynamiske zone med lavt grundvand, oplever derfor stor variation i infiltrationen. I dette studie modelleres de hydrologiske processer i jorden og sammenlignes med estimerede strømningssrater baseret på en opdeling af flow fra afløbssystemets pumpestationer.

Hovedkonklusioner:

- Kapillærkræfter i jorden er afgørende for dynamikken i lavtliggende grundvandsspejl og forårsager dynamiske reaktioner i vandstanden ved regnhændelser.
- Grundvandsniveauets dynamik er afgørende for infiltrationen af uvedkommende vand til afløbssystemer, særligt i områder hvor grundvandsspejlet svinger omkring ledningsniveauet som følge af kapillærkræfter. Dynamikken drives af samspillet mellem nedbør og kapillære processer i den umættede zone. Indsivning kan derfor ikke entydigt tilskrives enten nedbør (ovenfra) eller grundvand (nedenfra), men opstår som et resultat af deres kombinerede effekt, styret af kapillærkræfter.
- Modellering af jordens vandindhold og grundvandsspejlets adfærd som følge af kapillærkræfter kan forbedre estimater af belastningen på afløbssystemer. Kombination af mere simple forsøg og lokalmodeller, kombineret med impulsresponsmodeller, bidrager med væsentlige information som tillader at udvikle løsninger som har fokus på de styrende processer, frem for symptombehandling.

English summary

Drainage systems in many cities are unintentionally loaded by groundwater infiltrating through damaged or non-watertight pipes, as well as by groundwater from forced underground drainage. With anticipated climate changes, this problem is expected to worsen, particularly in cities with shallow groundwater tables. Addressing the problem requires comprehensive mapping, which involves understanding the local groundwater table's location and dynamics, soil types and characteristics, as well as the condition of the drainage infrastructure.

Monitoring at an experimental site in Beder, Denmark shows great variability in the shallow groundwater table caused by capillary forces in the soil. These capillary forces cause significant increases in groundwater levels posterior to rainfall events. Groundwater levels are observed to increase tenfold in response to the rainfall depths. For example meaning a 50 cm increase in the water level in response to 50 mm of rain. Areas where the drainage system is vertically located in this dynamic zone of shallow groundwater therefore experience a great variability in infiltration. In this study, the hydrological processes in the soil are modelled and compared to estimated flow rates based on a decomposition of flow from drainage system pumping stations.

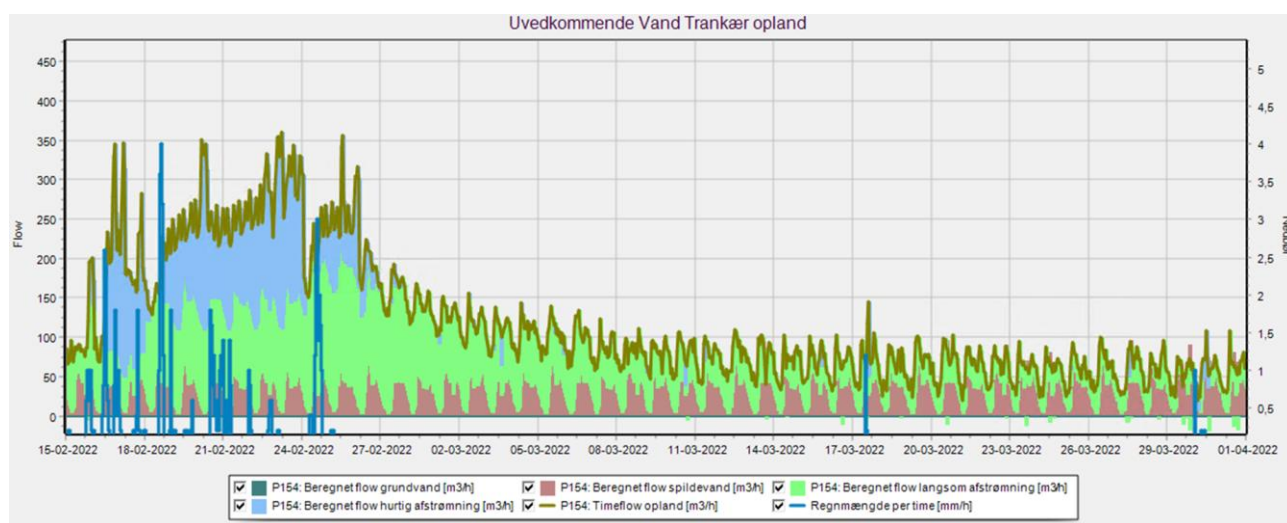
Highlights:

- Capillary forces in soil are crucial for the dynamics of shallow groundwater levels, causing highly dynamic responses of the water table to rainfall events.
- Groundwater level dynamics control the infiltration of extraneous water into drainage systems, especially in areas where the shallow groundwater table is fluctuating at depth levels around the drainage system, driven by capillary forces.
- Modelling soil water content and the behaviour of the shallow groundwater table due to capillary forces, can improve estimation of loads on drainage systems

Introduktion

I Aarhus Vands forsyningsområde er det identificeret, at det største bidrag af uvedkommende vand til afløbssystemet er bidrag fra regnbetinget indsigning til afløbssystemer, som forekommer i 10 til 12 dage efter en regnhændelse. Dekomponering (udviklet i projektet DRAINMAN) af tilløb til pumpestationer i komponenterne spildevand, grundvand, hurtig og langsom afstrømning har givet en grundlæggende forståelse af, at den langsomme afstrømning om vinteren bidrager med betydelig respons på afløbssystemet og renseanlægget. På Figur 1 ses et eksempel på en dekomponeringskurve. Bidraget kan ikke alene forklares af overfladeafstrømning på vandmættede ubefæstede arealer (undersøgt detaljeret i projekterne MOGO, MOTO og VandKant) og heller ikke forklares af grundvandsindsivning og dennes sæsonvariationer. Der foregår derfor, i den umættede zone, en vandtransport og interaktion mellem jordmatricen og afløbssystemet, som ikke direkte kan kvantificeres. Projektet har fokus på at undersøge hvilke processer, som styrer disse observationer. Er det indtrængning af grundvand pga. grundvandsspejl over kloakniveauet, eller er det nedbør som trænger ind i kloaksystemet, eller er det en horisontal gradient, som er årsagen til pludselig indtrængning af vand i kloaksystemet?

I takt med klimaændringernes forventelige øgede temperaturer og nedbørsmængder, fx i efterår og vinter og deraf følgende stigning i jordens vandmætning og grundvandsspejl forventes det identificerede problem at kunne forværres betydeligt over de næste årtier. Dette kan udfordre vandselskabernes overholdelse af serviceniveauer og resultere i utilsigtede miljømæssige konsekvenser fx ved øgede aflastninger fra overløb, større udledte stof- og vandmængder fra renseanlæggene grundet dårligere rensning og betydelig større tilløb til renseanlægget, oversvømmelser i vandmiljøet og byrummet mv. Dette kan nødvendiggøre store investeringer i anlægskapacitet på renseanlæg og afløbssystem til håndteringen af den øgede mængde "rent" vand til systemerne. Den øgede langsomme tilstrømning til afløbssystemet ses både i spildevandssystemet og regnvandssystemet, så de gængse metoder til adskillelse af regn og spildevand er ikke anvendelige til forklaring af ovenstående respons.



Figur 1: Eksempel på dekomponeringskurve, med (rød) spildevand, (lysseblå) hurtig afstrømning, (lysegrøn) langsom afstrømning

Projektet har til formål at belyse, analysere og forstå de styrende processer, for at kunne håndtere nuværende og kommende udfordringer med det terrænnære grundvand i disse byzoner. Det udføres ved at kombinere målinger af det terrænnære grundvand i byområde, labforsøg og -analyser, lokalmodeller, og modeller på oplandsniveau. Herunder beskrives projektets hovedaktiviteter i arbejdsplaner (AP). Ansvarlige partnere er angivet i parentes, men alle partnere bidrager til alle arbejdsplaner. En mere detaljeret beskrivelse af hver arbejdsplan er givet nedenunder.

AP1 Projektledelse og formidling (Aarhus Vand)

Denne arbejdsplan indeholder alle aktiviteter som projektledelse, mødeledelse og præsentationer på nationale og internationale konferencer. Eksempler på disse aktiviteter er DANVA konferencen i Kolding (2024) og den Urban Drainage Modelling Conference i Innsbruck, Østerreich (2025). Formidlingsopgaven er dog ikke afsluttet efter projektets løbetid og det fortsætter efter projektet er afsluttet, som beskrives i afsnittet om 'Formidlingsplan'.

AP2 Monitering og dataanalyse (Aarhus Vand og Aalborg Universitet)

Laboratorieforsøg til test af mulige sensorer i storskala jordboks med indlejret rørsystem og styring af aktuelt og kapillært vandspejl.

Etablering af lokale målestationer der på lokaliteter opstrøms og nedstrøms profilerer jordmatricen ved måling af in-situ vandindhold og poretryk. Der foretages geologiske undersøgelser samt pejling af sekundære grundvandspejl. Dette intensive måleprogram kombineres med eksisterende og løbende målinger af primær grundvandsstand, nedbør, vandløbsafstrømning, afstrømning i afløbssystem, vandstand i bassiner, mv.

AP3 Modellering, lokalskala (Aalborg Universitet)

Der udvikles en numerisk detailmodel for vandtransport mellem overflade, grundvandspejl og interaktion med afløbssystemet. Modellens komponenter og kompleksitet vil afhænge af hvilke af projektets hypoteser, som kan påvises af observationer.

AP4 Modellering på oplandsskala (NIRAS)

Med udgangspunkt i observationer, lokalskalamodellering og klimafremskrivning opstilles en RDII-model (Rainfall dependent infiltration and inflow) på oplandsskala. Procesforståelse opnået på lokalskala anvendes til udvikling af et koncept for parameterisering af den terrænnære hydrologi og hydrologeologi baseret på datasæt med høj rumlig dækning. Fx jordartskort, ledningsoplysninger, arealanvendelse, højdemodeller mv. Dette har til formål at udarbejde mere robuste modeller, der på sigt kan anvendes som et generelt planlæg-

ningsværktøj og udvikles til at lave samfundsøkonomiske vurderinger af mulige løsnings- og afværgescenarier samt screene nye byområder.

RDII-modellen analyseres, og følsomhedsanalyser udføres, baseret på den opnåede procesforståelse på lokalskala. Denne analyse belyser også den temporale komponent i følsomhed af modellen over for forskellige komponenter eller parametre. Disse analyseresultater bruges som input til design og udførelsen af en opdateret modelkalibrering, som forbedrer modellens evne til at repræsentere observerede flow i systemet.

Udover analyse og optimering af RDII modellen til repræsentation af flow i afløbssystemet, laves der også en analyse af dynamikken af det lokale terrænnære grundvandsspejl gennem puls-respons-funktioner. Disse funktioner beskriver, hvordan det dynamiske system reagerer over tid, når det udsættes for en kort input. Det forklarer hvordan systemet bliver påvirket af nedbørshændelser og hvordan sammenspillet mellem det terrænnære grundvand og jordmatrixens egenskaber styrer det terrænnære grundvandsspejl. Fordelen ved puls-respons-funktioner er, at disse hurtigt og effektivt kan repræsentere de dynamiske terrænnære hydrologiske processer.

Projektets betydning for vandbranchen

Projektet har væsentlig betydning for den danske vandbranche, da det adresserer en af de største og mest komplekse udfordringer i de kommende årtier: håndteringen af terrænnært grundvand og regnbetinget indsivning i afløbssystemerne. Med stigende nedbør og højere grundvandsspejl som følge af klimaændringer vil udfordringerne med uvedkommende vand vokse over tid, hvilket kan medføre store driftsmæssige og miljømæssige konsekvenser. Projektet bidrager med ny viden, som danner grundlag for udvikling af konkrete værktøjer – både med procesforståelse og teknikker som puls-responseanalyser, hvilket kan bistå forsyningerne til at opretholde et velfungerende afløbssystem uden uforholdsmæssigt store investeringer i nye anlæg.

For vandsektoren ligger værdien især i følgende:

Effektiviseringspotentiale og bedre planlægning: Projektet har identificeret, at den umættede zone spiller en afgørende rolle for de hydrologiske processer, der påvirker indsivning til afløbssystemet. Det er ny og vigtig viden, som giver os mulighed for at forbedre grundlaget for dimensionering og prioritering af investeringer. Med denne indsigt kan vi undgå unødvendige udvidelser af kapaciteten på renseanlæg og afløbssystemet og i stedet målrette løsninger, så den største effekt opnås.

Forbedret klimatilpasning: Projektet har implementeret og testet teknikker samt analysemetoder, som puls-respons-metoden, hvilke kan implementeres i analyseværktøj til understøttelse af en robust beslutningsproces. Værktøjerne er udviklet med fokus på at være tilgængelige og praktiske, uden at kræve dyre eller omkostningstunge modeller. Dermed kan forsyningerne i højere grad planlægge langsigtet og tværgående, hvor afløbssystem, grundvand og overfladevand samtænkes.

Forsyningssikkerhed og miljøbeskyttelse: Uvedkommende vand i kloaksystemet er for mange forsyninger en af de største årsager til overløb og overbelastning af renseanlæg. Kortlægning og forståelse af de styrende processer er det første skridt i at afhjælpe dette problem. Ved at mindske utilsigtede overløb og reducere belastningen på afløbssystemet, herunder pumpestationer og renseanlæg forbedres kvaliteten af udledt vand til recipienter. Dette bidrager til en mere stabil drift, lavere risiko for overløb og en styrket beskyttelse af natur og grundvandsressourcer.

Vidensopbygning og metodeudvikling: Projektet leverer ny procesforståelse, der kan omsættes til generelt anvendelige modeller og screeningsværktøjer. Denne viden vil ikke kun gavne Aarhus Vand og projektpartnerne, men også kunne udrulles til hele branchen – særligt i områder med lignende geologiske forhold som i Østdanmark er processerne i den umættede zone vigtige.

Regulering og sektorens rammevilkår: Projektet bidrager til at skabe et bedre vidensgrundlag, som udfordrer den nuværende regulering og kan danne en basis for en mere nuanceret regulering end den nuværende, der traditionelt har opdelt overfladevand, grundvand og afløbssystemer i siloer. Den tværgående procesforståelse, som projektet skaber,

kan danne grundlag for mere integreret regulering og dermed for en bæredygtig og fremtidssikret vandhåndtering.

Samlet set kan projektet ses som et vigtigt skridt mod en mere holistisk tilgang til håndteringen af det urbane vandkredsløb. Det øger ikke alene sektorens tekniske viden og handlemuligheder, men styrker også samarbejdet mellem forsyninger, myndigheder, rådgivere og forskningsinstitutioner. Dermed skaber projektet værdi både i form af direkte løsninger, fremtidige investeringseffektiviseringer og et mere robust vidensgrundlag for klimatilpasning i hele den danske vandbranche.

Marked og/eller anvendelsesmuligheder

Langsomme afstrømningsbidrag fra indsvivende terrænnært vand identificeres i Aarhus Vands systemer, men problemstillingen er aktuel for hele morænelandskabet i Østdanmark. Gennem projektet ønskes det derfor at kortlægge, hvorvidt tilstrømningen generelt kommer oppefra, nedefra eller fra siden. Dette kan skabe en videnskabelig nyhedsværdi som er relevant for vandselskaber med tilsvarende geologiske forhold.

En manglende forståelse af vandets bevægelse i jordmatricen kan resultere i u hensigtsmæssige anlægstekniske løsninger, som f.eks. fejlplacering af drænsystemer. En øget procesforståelse kan på sigt bidrage til gentænkning af anlægstekniske løsninger til håndtering af uvedkommende vand i det tekniske vandkredsløb. Ved yderligere konceptualisering vil den øgede forståelse bidrage til en generel anvendelig metode til brug i planlægning.

Projektet skaber nyhedsværdi ved at undersøge det bynære vandkredsløb. Den nyskabte viden og fremmelse af forståelse af processer og drivers for langsigtet indtrængning af terrænnært grundvand i afløbssystemet, kan anvendes på tværs af vandselskab og myndighedsmæssige administrative barrierer. Det udvider det vidensgrundlag som anvendes når klimatilpasningsløsninger dimensioneres. Derudover kan det udfordre den nuværende miljømæssige regulering af overfladevand, afløbssystemer og grundvand.

Næste skridt

Projektets resultater falder sammen med en ny lovgivningsmæssig ramme, der fra 1. juli 2025 giver spildevandsforsyninger mulighed for at håndtere terrænnært grundvand kollektivt og takstfinansieret, forudsat at løsningerne er samfundsøkonomisk hensigtsmæssige. Projektets viden, modeller og værktøjer kan med fordel bringes i anvendelse, idet kommuner og forsyninger nu er forpligtet til at planlægge for og dokumentere udfordringer med terrænnært grundvand i spildevandsplanerne samt gennemføre de nødvendige analyser og afværgeforanstaltninger.

Implementering i praksis sker ad flere spor:

Integration i spildevandsplanlægningen: Projektets procesforståelse og modeller kan umiddelbart indgå i den lovpligtige kortlægning og udpegning af områder i kommunernes spildevandsplaner. Metoderne styrker kvaliteten af datagrundlaget i KAMP/HIP og bidrager med supplerende lokal hydrologisk forståelse, hvilket er nødvendigt for at kunne dokumentere de områder, hvor der er fare for oversvømmelse eller indsivning. Analyser som indeholder information om det terrænnære grundvand, koblet sammen med information om jordegenskaber (som jordspecifikke kapillære egenskaber) og nedbørsmønstre, vil styrke udpegning af områder i kommunernes spildevandsplaner og bidrage til en farekortlægning i kommuneplanerne baseret på et bedre datagrundlag.

Samfundsøkonomiske analyser og prioritering: Med beregningsbekendtgørelsen stilles der krav om, at forsyningerne dokumenterer de økonomiske konsekvenser af forskellige løsningsscenarier. Projektets modeller for dynamikken i den umættede zone og samspillet mellem jordmatrice og afløbssystem kan anvendes som input til disse analyser, så de bygger på et mere realistisk og robust vidensgrundlag.

Udvikling af screenings- og beslutningsværktøjer: På baggrund af projektets resultater er det muligt at udvikle simple screeningsværktøjer, som kommuner eller forsyninger kan bruge til at identificere og prioritere indsatsområder. Værktøjerne kan fungere som en første vurdering, inden mere detaljerede samfundsøkonomiske analyser og tekniske løsninger udarbejdes. Screeningsværktøjerne vil indeholde oplysninger om jordtyper, grundvandsstand, nedbørsmønstre og kloakledningsdybde samt evt. andre oplysninger såsom tilstand af kloakledninger.

Pilotprojekter og erfaringsopsamling: Projektets metoder kan anvendes direkte i kommende demonstrations- og implementeringsprojekter hos Aarhus Vand og andre forsyninger. Metoder som responsfunktioner og tidsseriemodellering er allerede afprøvet i praksis uden for selve udviklingsprojektet, hvor de har vist god evne til at beskrive dynamikken i det terrænnære grundvand og forbedre forståelsen af påvirkningen af afløbssystemer. Disse erfaringer danner et vigtigt grundlag for videre anvendelse og opskalering. Fremtidige cases vil bidrage til at operationalisere metoderne yderligere og skabe erfaringer, som kan deles med branchen gennem f.eks. DANVA og KL.

Samlet set vil projektets værktøjer og metoder derfor hurtigt kunne finde anvendelse i praksis. Lovgivningen har skabt et implementeringsrum, hvor værktøjerne ikke blot er relevante, men nødvendige for at kommuner og forsyninger kan leve op til de nye krav. Dermed bliver projektet både et fagligt og regulatorisk bindeled mellem forskning, forsyningspraksis og myndighedsopgaver, og kan på sigt bidrage til udviklingen af nationale standarder og branchens fælles retningslinjer for håndtering af terrænnært grundvand.

Formidling

Formidling af projektets resultater og ny viden og forbedret procesforståelsen, kan inddeles i 3 kategorier: (1) formidling internt hos projektets samarbejdspartnere, (2) akademisk formidling gennem afgangsprojekter og internationale videnskabelige konferencer, (3) formidling til den danske vandsektor gennem nationale konferencer.

- 1) Gennem projektets løbetid blev der løbende afholdt møder med det formål at holde alle projektpartnere opdateret samt at drøfte, hvilke konsekvenser den ny procesforståelse har for hvordan tilgangen til opgaver inden for klimasikring og terrænnært grundvand. Derudover er der i projektets løbetid etableret nye samarbejder, hvor den nye procesforståelse er blevet integreret og anvendt til at konsekvensvurdere klimaændringer i andre områder udenfor VUDP-projektet. På denne måde er projektets nyvundne viden blevet formidlet til andre medarbejdere, som er involveret i disse projekter.
- 2) Der har været flere specialestuderende involveret i projektet med fokus på feltarbejde, labforsøg og 1D/2D modellering. Deres arbejde indgik som en del af deres afgangsprojekter, og resultaterne blev formidlet gennem projektrapporteringer og præsentationer på workshops:

Frederik Kronborg Bang Sørensen og Benjamin Terndrup Hedevang (2023) Indsivning af uvedkommende vand i afløbssystemer - Numerisk og eksperimentel bestemmelse. Kandidatspeciale Aalborg Universitet, Vand og Miljø.

Emil Bom Pedersen, Gustav Ditlev Pedersen og Maiken í Dali Nørlund (2024). Development of a screening tool for risk assessment of groundwater infiltration into sewer systems - including capillary fringe induced rapid groundwater rise during rain. Aalborg Universitet, Vand og Miljø.

Jakob Bomholt (2025): Kapillarzonens effekt på grundvandsstigninger og uvedkommende vand i urbane områder. Aalborg Universitet, Vand og Miljø.

For yderligere detaljer om adgang specialeprojekter, se litteraturliste.

Ternært Vand har herudover være præsenteret ved konferencen Urban Drainage Modelling Conference 2025 i Innsbruck, Østrig 15-19 september 2025 med præsentationen: "Monitoring and modelling of shallow groundwater dynamics and interaction with sewer systems" (Søren Thorndahl, AAU)

- 3) Projektet har bidraget med oplæg på DANVAs Dansk Vand-konference i 2024 og 2025, og et afledt projekt "Anvendelse af reponsfunktion på TGV måledata" blev præsenteret på Dansk Vand 2025. Det afledte projekt har fokus på anvendelse af tidsseriemodeller til simulering af terrænnært grundvand og bygger videre på den viden, der er opnået i VUDP-projektet. Følgende oplæg har haft fokus på formidling af dette VUDP projekts samt afledt projektets resultater:

Dansk Vand 2024 i Kolding: Interaktion mellem afløbssystemer og terrænnært vand: fra oven, ned og siden, Niels Claes og Søren Thorndahl

Dansk Vand 2025 i Kolding: Anvendelse af tidsseriemodeller til simulering af terrænnært grundvand, Troels Norvin Vilhelmsen

EVA-temadag: Terrænnært grundvand – Data, modeller og håndtering i praksis 23. oktober 2025, i Nyborg: Variation i det terrænnære grundvandsspejl på kort og lang tidsskala, Søren Thorndahl.

Herudover har flere projektdeltagere deltaget i møder i Spildevandskomiteens arbejdsgruppe om terrænnært grundvand, som blandt andet har bidraget med høringsvar til lovgivningsændringer.

Formål

Afløbssystemer i mange danske byer belastes utilsigtet af indsivende vand og drænvand, og pga. klimaændringerne er det et observeret stigende problem. Hvorvidt øgede afstrømningsbidrag, der observeres i lange perioder efter regn, skyldes indsivning fra umættet zone, lokale og kortvarige stigninger i terrænnært grundvand eller generelle grundvandsstrømninger er uvist. Derfor vil nærværende projekt gennem monitoring, analyse og modellering kortlægge afløbssystemers interaktion med de hydrologiske processer, der foregår i den øverste del af jordmatricen, hvor afløbssystemet er placeret. Formålet er: 1) at kunne kortlægge indsivningsbidrag og dennes tids- og stedlige variabilitet samt forståelse af styrende processer og 2) at kunne konsekvensvurdere problemets udvikling ved implementering af procesforståelse og data fra (1) i modeller, som karakteriserer spildevandssystemet i byzoner.

Output

Projektet er primært vidensopbyggende i forhold til at opnå en forståelse for de hydrologiske processer der forgår i jordmatricen mellem terræn og grundvandsspejl, samt hvordan disse processer, bidrager til afstrømningen i afløbssystemer. Denne vidensopbygning kan opdeles i 3 delenheder, som formidles mere detaljeret i afsnit 'Projektresultater':

- Der leveres en analyse af feltarbejde og monitorering af den terrænnære grundvandsdynamik i et urbant opland i Aarhus Kommune, ved Beder.
- Resultater og analyser af en kombination af labforsøg og 1D/2D modeller, som genskaber de observerede feltprocesser under kontrollerede forhold, viser, hvilke processer der styrer dynamikken i det terrænnære grundvandsspejl og hvordan jordtyper og nedbørshændelser påvirker denne.
- Der udføres en opskaleringsanalyse for at identificere de mest styrende parametre i RDII-modellen, herunder modellens temporale følsomhed over for forskellige parametre. Udover analysen af RDII-modellen gennemføres en tidsserieanalyse af det dynamiske terrænnære grundvandsspejl ved brug af puls-respons-funktioner. Denne tilgang demonstrerer, hvordan en kombination af simple funktioner hurtigt og præcist kan beskrive og fremskrive dynamikken af det terrænnære grundvand, når den kombineres med geologiske viden og nedbørsdata.

Med en øget forståelse af samspillet mellem vandstrømme i det urbane vandkredsløb – herunder terrænnært grundvand, nedbør, jordmatricens egenskaber og afløbssystemer – kan projektets resultater omsættes til en række konkrete anvendelser i både planlægning, drift og investering:

- Målrettet håndtering af uvedkommende vand: Udvikling af nye løsningsmetoder, der kan styre og omdirigere den langsomme tilstrømning til ønskede lokaliteter, fx gennem optimeret placering af dræn, kapillærbrydende lag eller lokale afværgeløsninger.
- Forbedret dimensionering af afløbssystemer: Inddragelse af dynamikken i det terrænnære grundvand i dimensioneringsgrundlaget, så både kortvarige peaks og langvarige belastninger indregnes mere realistisk.
- Klimatilpasning og risikokortlægning: Styrket grundlag for udpegning af risikoområder i spildevands- og kommuneplaner, herunder områder med høj risiko for indsvivning, opstuvning og påvirkning af bygninger og infrastruktur.
- Screenings- og prioriteringsværktøjer: Udvikling af simple, operationelle værktøjer baseret på jordtype, grundvandsdynamik og nedbør, som kan anvendes til at identificere og prioritere indsatsområder før detaljerede analyser.

- Samfundsøkonomiske analyser: Bedre beslutningsgrundlag for valg mellem forskellige løsningsscenarier ved at inkludere de styrende processer for terrænnært grundvand i beregninger af effekt og omkostninger.
- Drift og overvågning: Forbedret tolkning af pumpedata og måleserier samt mulighed for tidlig varsling af perioder med øget belastning fra terrænnært grundvand.
- Beskyttelse af grundvandsressourcer og vandindvinding: Vurdering af hvordan ændringer i afstrømningsmønstre og afværgetiltag påvirker grundvandsdannelse og indvindingsforhold.
- Natur- og recipientpåvirkning: Bedre vurdering af samspillet mellem grundvand, vandløb og vådområder, herunder risiko for ændret baseflow og økologisk tilstand.

Den opnåede procesforståelse gør det muligt at integrere terrænnært grundvand som en selvstændig og styrende komponent i konsekvensvurderinger på tværs af myndigheds- og sektorgrænser. Dette er en forudsætning for at kunne udvikle robuste, bæredygtige og omkostningseffektive løsninger, der både sikrer serviceniveauer i afløbssystemet og samtidig minimerer påvirkningen af vandressourcer og natur.

Projektresultater

Målelokaltet

Der er i Ternært Vand etableret syv pejleboringer i Beder. Boringerne er 2-4 meter dybe og filtersat i bunden. Boringernes placering ses på Figur 2. Alle målestationer er etableret med håndbor. Alle boringer er tilbagefyldt med sand, bentonit, samt fyld, for at minimere påvirkning af det målte terrænnære grundvand. Figur 3 viser et eksempel på en målestation.

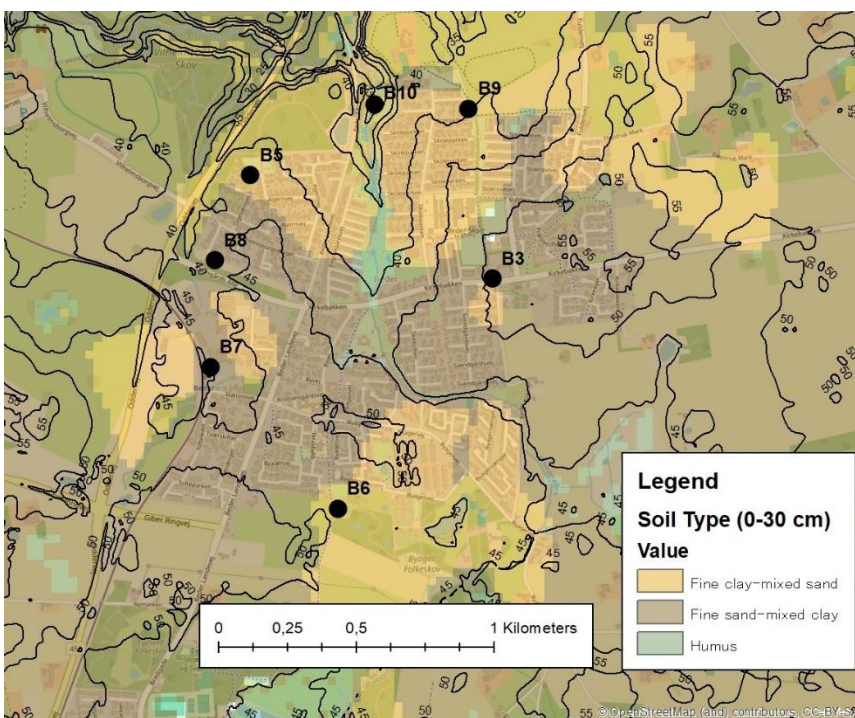


Figur 2: Oversigtskort over målestationer i Beder.



Figur 3: Eksempel på målestation

På Figur 4 ses placering af boringer/målestationer sammen med højdekurver og områdets terrænnære geologi.



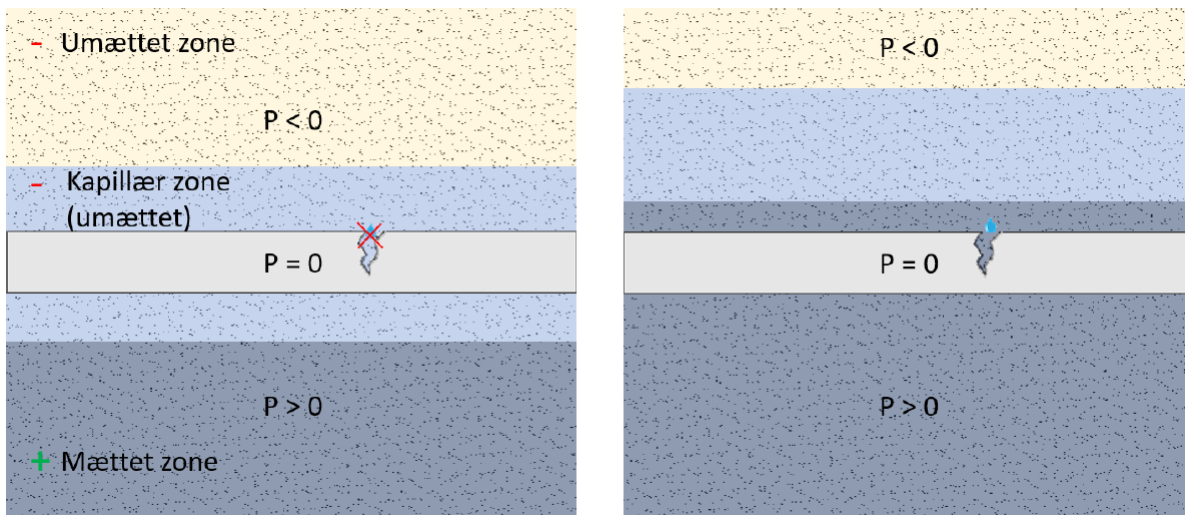
Figur 4 Placering af målestationer med højdekurver samt den terrænnære geologi baseret på Aarhus Universitets JB jordtypekort (2014), 0-30 cm

Ved etablering af målestationerne, blev der også opsamlet jordprøver, til analyse i jordfysiklab. Dataene anvendes både i labforsøg og til lokal modellering af jordprofilens hydrologiske respons på nedbør, hvilket beskrives nærmere i følgende afsnit. I bilag A vises tidsserier og jordprofiler for samtlige målestationer.

Laboratorieforsøg

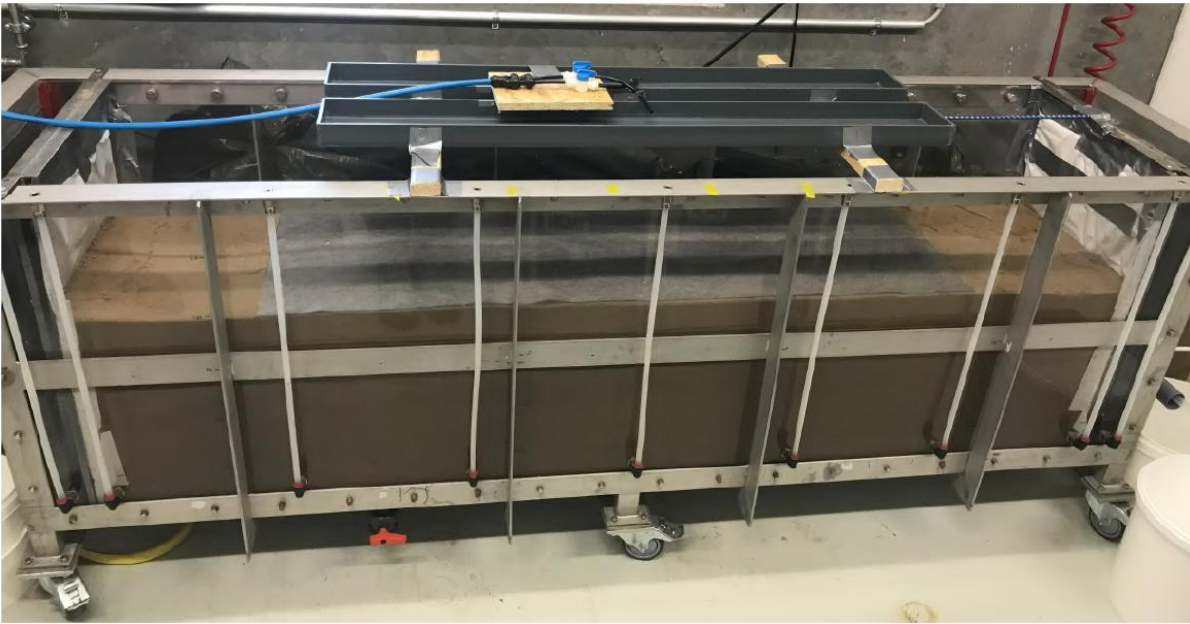
Laboratorieforsøg: Indsivning af grundvand til drænledning

For at undersøge sammenhængen mellem nedbør og indsivning til ledninger (utæt afløbssystem eller tilkøbet dræn) er der gennemført en række kontrollerede laboratorieforsøg på Aalborg Universitet. Gennem to specialeprojekter (Sørensen og Hedevang, 2023 og Pedersen et al., 2024) undersøges hypotesen om at indsivning til ledningsnettet først optræder, når grundvandsspejlet stiger op over ledningerne, og der derfor opstår et positivt vandtryk som forårsager indsivning. Den fysiske proces er illustreret på Figur 5.



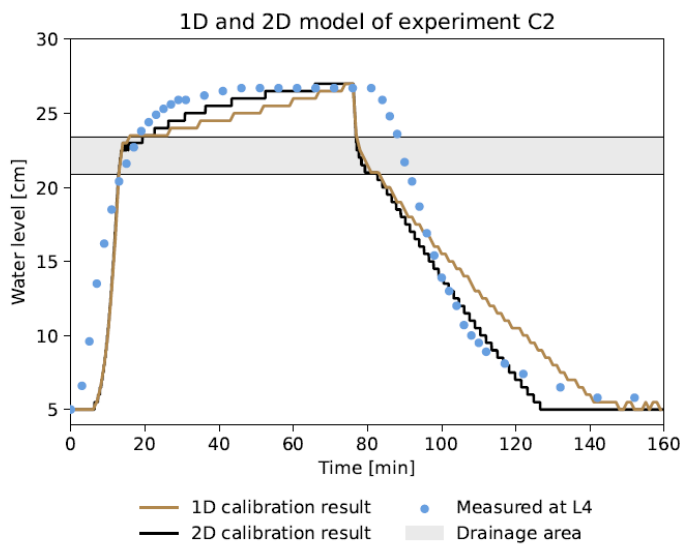
Figur 5: Illustration af indsivningsproces: Venstre: Røret ligger i den kapillære zone, som næsten er vandmættet. Suget i jordmatrixen holder på vandet og der sker ingen indsivning. Højre: Efter en regnhændelse mættes den kapillære zone, og overtrykket i den mættede zone resulterer i indsivning. (Sørensen og Hedevang, 2023).

Figur 6 viser en laboratorieopstilling af en "sandkasse" med målene 180 x 41 x 63 cm. Kassen er fyldt med kompakteret sandjord fra Store Restrup Fælle ved Aalborg og i kassen er indlagt et slidset drænrør. Forsøg udføres ved at tilføre kunstig regn fra toppen af kassen. Herefter måles ændringer i trykniveau (flere steder i kassen), svarende til et stigende grundvandsspejl, samtidig med at vandføringen ud af drænledningen bestemmes.

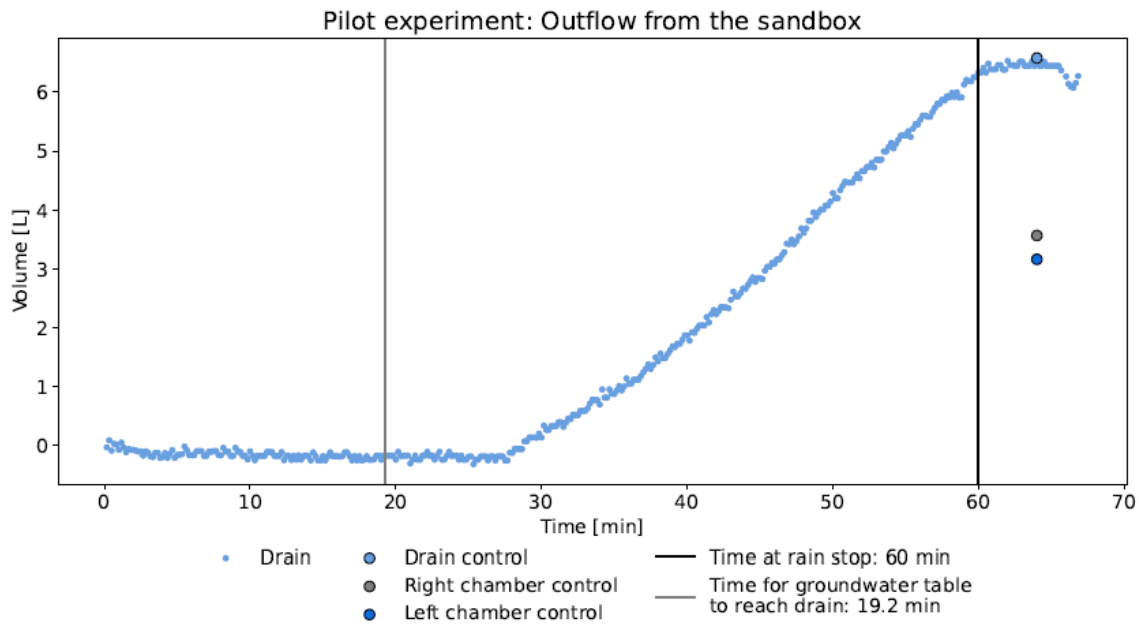


Figur 6: Foto af "sandkasse" pakket med jord. (Pedersen et al., 2024)

Udover de fysiske forsøg er de hydrologiske processer fra kunstig nedbør, infiltration i jorden, vandmætning, stigning i trykniveau og indsvivning til drænledning, simuleret med numeriske modeller. Detaljer herom kan findes i Sørensen og Hedevang (2023) og Pedersen et al. (2024). Et eksempel på målinger sammenholdt med modelsimuleringer er vist i Figur 7 og Figur 8.



Figur 7: Sammenligning af målinger af stigning i trykniveau sammenlignet med modelsimuleringer. (Pedersen et al., 2024)

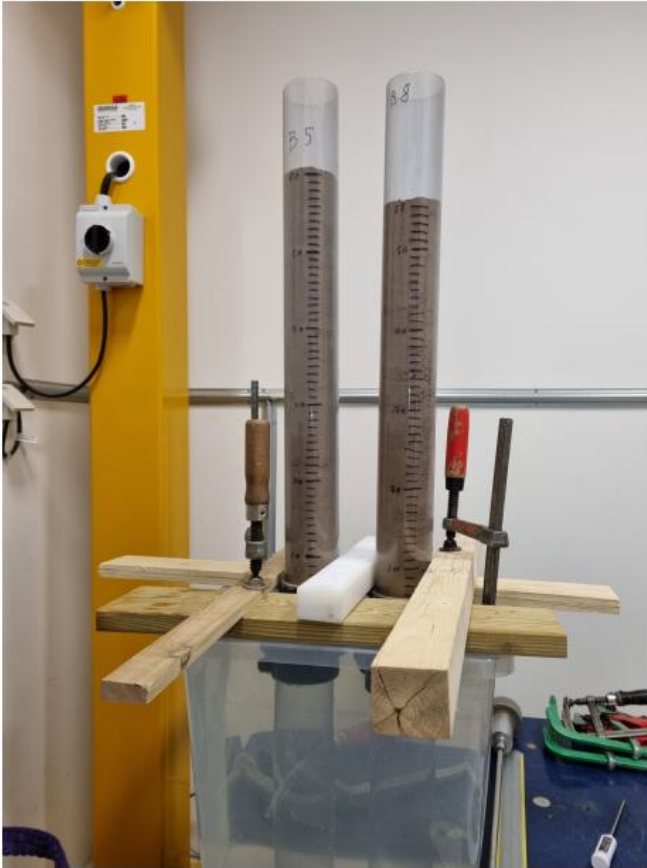


Figur 8: Eksempel på akkumuleret infiltration til drænledning. (Pedersen et al., 2024)

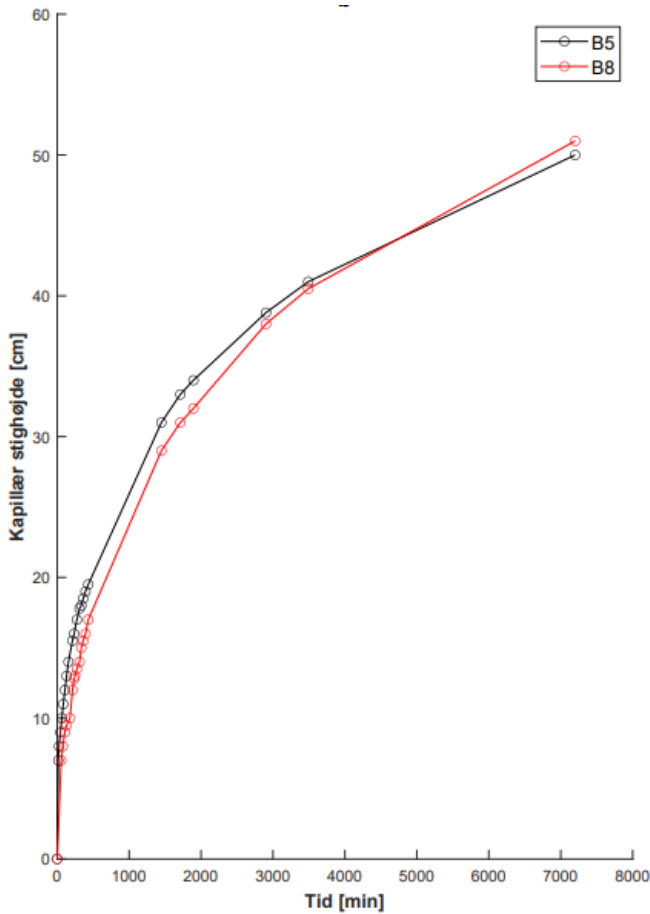
Laboratorieforsøgene bekræfter hypotesen om at indsvivning til drænledningen først sker under fuldt mættede forhold. Desuden har forsøg med forskellige pakninger vist at jordens kompakteringsgrad er særdeles vigtigt dels for jordens magasineringsevne og for den jordens hydrauliske ledningsevne i jorden. En meget kompakteret jord, som man typisk vil finde i byområder omkring rør, vil således dels bidrage til en høj stigning trykniveauet efter regn og medføre et ret langsomt fald i trykniveauet igen efter regn sammenlignet med en mere løst pakket jord.

Laboratorieforsøg: Kapillær stighøjde og jordkarakterisering

For at kunne karakterisere den potentielle dynamik i grundvandsniveauet i Beder er der gennemført jordkarakterisering og efterfølgende lavet forsøg for at bestemme den kapillære stighøjde for en pakket jordsøjle. Figur 9 viser et foto af to søjler, hvor den kapillære stighøjde kan aflæses som funktion af tiden, når søjlerne nedstikkes i en balje med vand og jordmatrixens kapillære kræfter "suger" vandet op. Søjlerne er pakket med jord taget ved boring B5 og B8 i Beder og resultaterne af forsøget er vist i Figur 10.



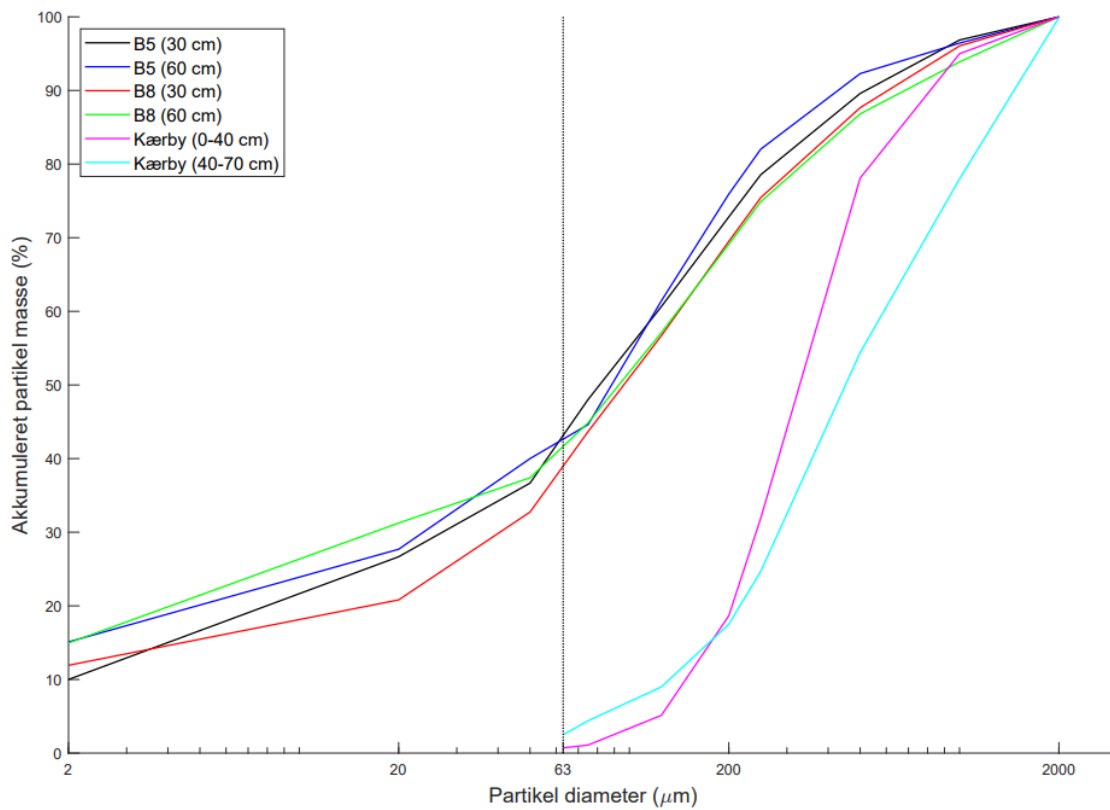
Figur 9: Foto fra eksperimentelt setup for undersøgelse af kapillær stighøjde. (Bombolt 2025)



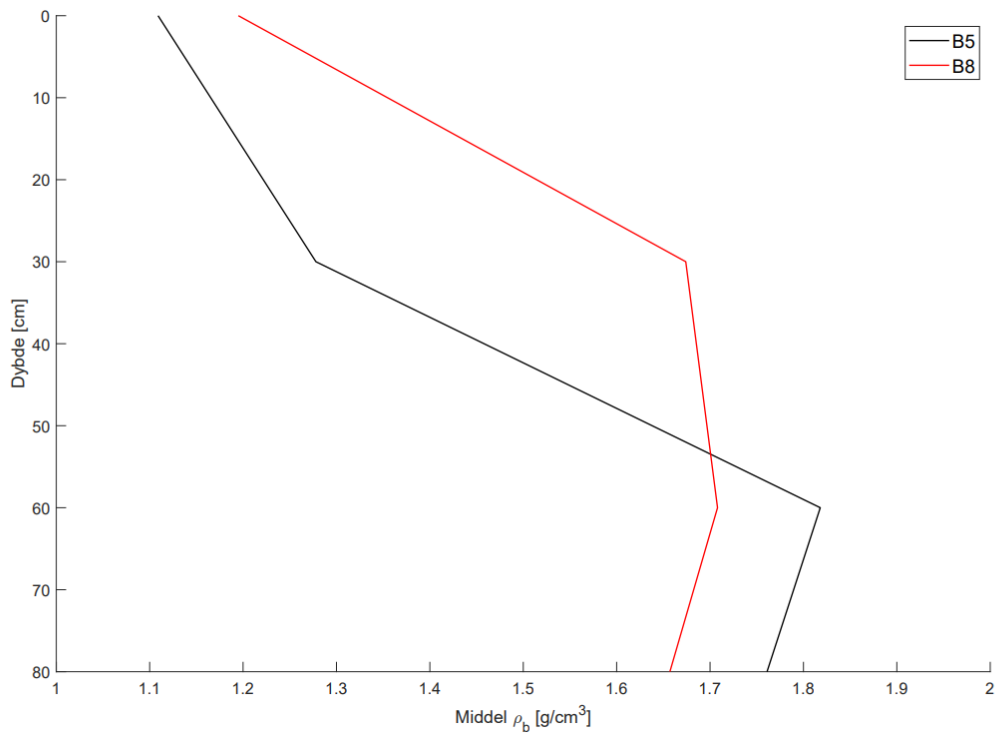
Figur 10: Kapillær stighøjde som funktion af tiden baseret på pakkede jordprøver nær Beder borer B5 og B8. (Bombolt 2025).

Herudover er der med de udtagne jordprøver i forskellig dybde gennemført sigteanalyse og hydrometertest (kornkurve Figur 11). Kornkurverne viser, at prøverne fra Beder (B5 og B8) har en flad hældning og dermed repræsenterer en velgraderet jord med stor variation i kornstørrelser. Desuden fremgår det, at andelen af finkornet materiale er relativt høj og for de dybere lag ligger på omkring 40 %.

Udover kornkurver for de udtagne jordprøver er prøverne volumenvægt bestemt i forskellige dybder (Figur 12). For begge lokaliteter ses en væsentlig stigning i volumenvægt som funktion af dybden, hvilket tyder på at jordens kompakteringsgrad stiger med dybden.



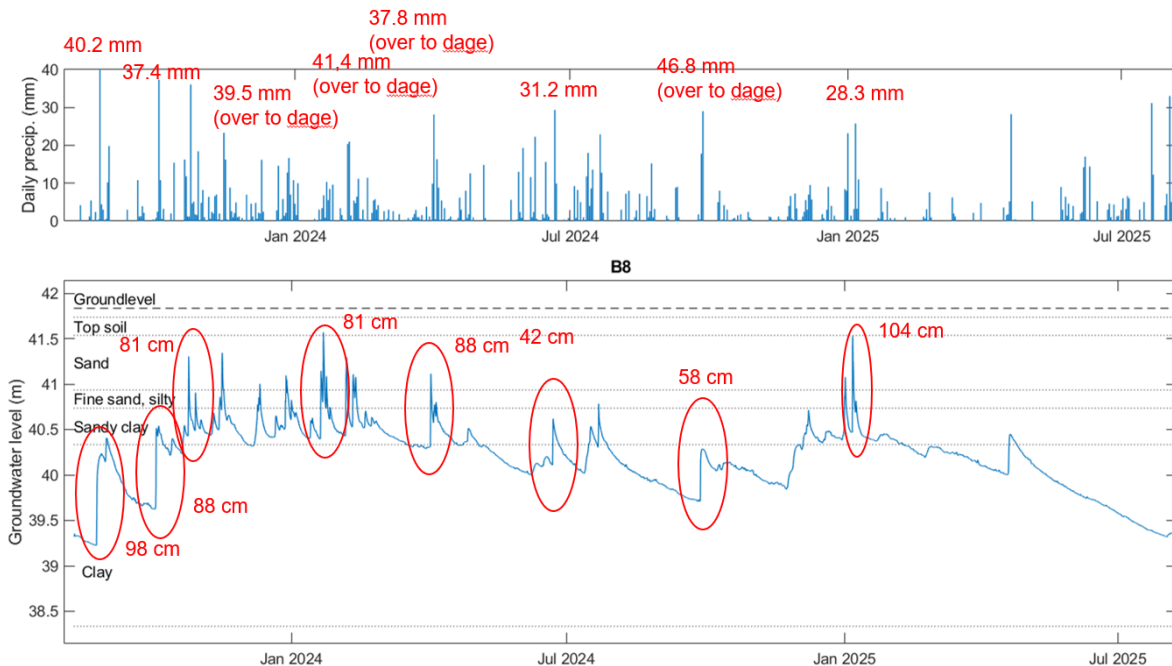
Figur 11: Kornkurve for jordprøver udtaget ved Boring B5 og B8 i Beder i 30 og 60 cm dybde sammenlignet med sandet jord fra Kærby, Aalborg. (Bombolt 2025)



Figur 12: Volumenvægt som funktion af dybde ved Boring B5 og B8 i Beder. (Bombolt 2025).

Analyse af måledata

For at illustrere udfordringerne ved et terrænnært og fluktuerende grundvandsniveau er der på Figur 13 vist en tidsserie af grundvandsstanden i boring B8 i Beder over en næsten toårig periode (2023-2025). Grundvandsstandsovervågningen afslører nogle interessante hydrauliske egenskaber, som i det følgende afsnit vil blive brugt til at analysere variationen i grundvandsstanden efter regn.



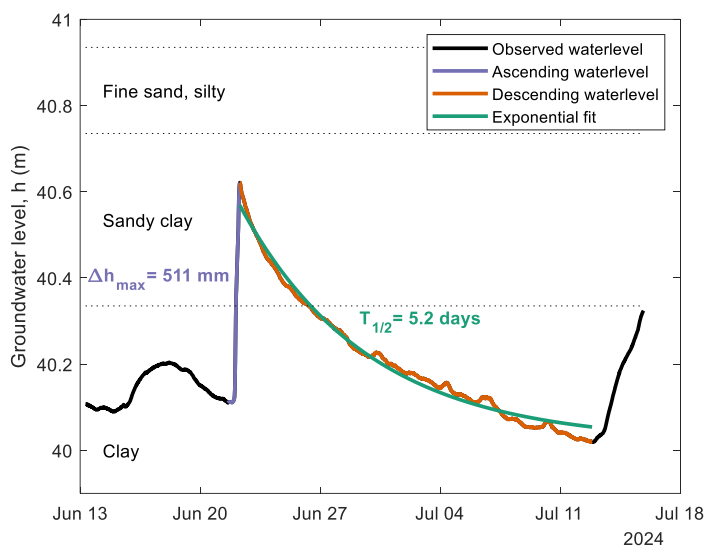
Figur 13: Tidsserie for daglig nedbør og observeret grundvandsstand i Boring B8 i Beder.

Den første bemærkelsesværdige egenskab er en signifikant og pludselig stigning i grundvandsstanden forårsaget af regn. For nogle af de større enkeltstående regnhændelser med en (daglig) regndybde på 35–40 mm observeres en stigning i grundvandsstanden på 80–90 cm. Grundvandsresponsen er således omtrent 20 gange større end den initierende regnimpuls. Hvis vi betragter en vilkårlig jord med et volumetrisk vandindhold på 25 % (svarende til markkapacitet), der bliver fuldt mættet med et volumetrisk vandindhold på 50 % og udsat for 40 mm regn, ville vi forvente en stigning i grundvandsstanden på 80 mm (8 cm), alene ved forskydningen af luftfyldte porer med infiltrerende regnvand. I det faktiske system ser vi imidlertid en stigning, der er 10 gange større. Dette indikerer, at jorden ikke er drænet til markkapacitet, og at det faktiske volumetriske vandindhold er højere end forventet.

Et andet interessant hydraulisk fænomen, som kan observeres direkte ved analyse af tidsserien i Figur 13, er, hvordan de identificerede regnimpuls-responser i grundvandet afhænger af det absolutte niveau af grundvandet. Hvis vi for eksempel analyserer den første hændelse, der strækker sig fra august til oktober 2023, observeres det, at afdræningen af grundvandsstanden – fra omkring 1. september til det lokale minimum omkring 1. oktober – er forholdsvis langsom. Omvendt ses der andre responser på flere hændelser i perioden fra november til marts 2024,

hvor det aftagende forløb er langt hurtigere; visuelt resulterende i smallere toppe. Denne dræningseffekt skyldes sandsynligvis en lagdelt jordprofil, hvor den mere lerede jord i bunden af profilen reagerer langsommere end de øvre sanddominerede jordlag.

Figur 14 viser et tidsserieudsnit, hvor grundvandsdynamikken bestemmes på baggrund af to parametre: den maksimale pludselige stigning (Δh_{\max}) og halveringstiden ($T_{1/2}$), som repræsenterer henholdsvis den stigende og faldende fase. Halveringstiden findes ved at fitte en eksponentiel-henfaldsfunktion til "halen" efter maksimumvandstanden. Figuren viser også de jordlag, der blev identificeret under etableringen af borerne. Da enkelte vandstandsresponsers kan strække sig over flere jordlag, tildeles hvert respons et repræsentativt jordlag ved at beregne den gennemsnitlige grundvandsstand i henholdsvis den stigende og faldende del af tidsserien.



Figur 14: Principfigur for bestemmelse af stigende og faldende grundvandsspejl.

Den aftagende del af grundvandsspejlet efter regn er fittet til følgende eksponentielle henfaldsfunktion:

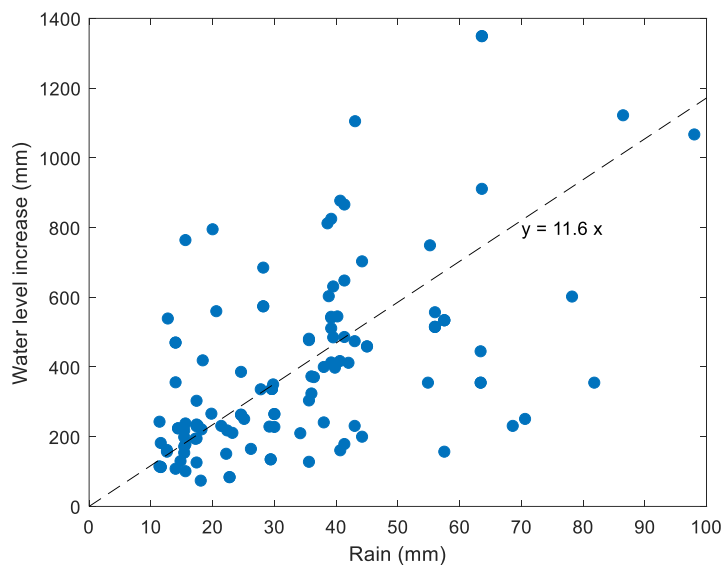
$$h = h_0 \cdot \exp(-k \cdot t)$$

Hvor h er den varierende grundvandsstand, h_0 er grundvandstandens startniveau, k er en henfaldskonstant og t tiden.

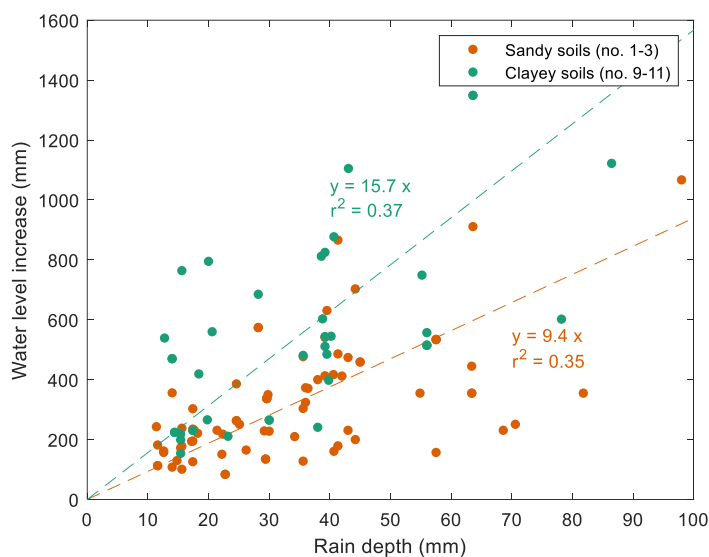
Halveringstiden $T_{1/2}$ kan bestemmes som:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}$$

Figur 15 viser en sammenfatning af alle syv etablerede boringer i Beder, hvor regndybden for identificerede enkeltstående hændelser større end 10 mm vises som funktion af den resulterende grundvandsstigning (se definition af hændelser på Figur 14). Regressionslinjens hældning indikerer, at grundvandet i gennemsnit stiger med en faktor 12 mere end regndybden. Selvom spredningen på disse resultater er stor, er det dog tydeligt, at der efter de identificerede regnhændelser sker en stor stigning i grundvandsspejlet. Figur 16 viser de samme data dog opdelt efter det dominerende jordlag som grundvandsspejlet befinder sig i (de siltede jordlag er undladt, da der er få observationer). Om end det er vanskeligt at gruppere de målte data entydigt, ses dog at for de mere sandede jorde er stigningen i grundvandsspejlet mindre end for mere lerede jorde.



Figur 15: Sammenhæng mellem regndybde og stigning i grundvandsspejl

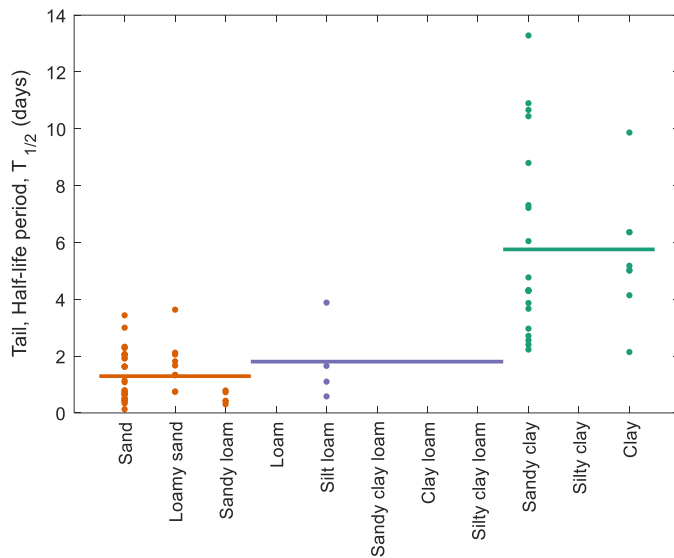


Figur 16: Sammenhæng mellem regndybde og stigning i grundvandsspejl opdelt efter dominerende jordtype.

Stigningen i grundvandsspejlet efter regn er sandsynligvis knyttet til kræfter i overgangszonen mellem fuldt og den umættede zone, nemlig kapillær-zonen. I denne zone er jord-vand-potentialet større end vandets tyngdekraft, hvilket resulterer i et "sug" af vand ind i de små porer og dermed et højere vandindhold. Potentialet for fuld vandmætning øges således med kapillærzonens højde, hvorfor der ses en større stigning i mere lerede jorde end i de tilsvarende sandede jorde.

Figur 17 viser halveringstiden, fittet ved hjælp af den eksponentielle henfaldsfunktion fordelt på jordtyper for de 135 identificerede faldende hændelser. Det er tydeligt, at den gennemsnitlige halveringstid for sandede jorde er markant lavere (1,3 dage) sammenlignet med de tilsvarende lerede jorde (5,8 dage). Den store forskel i den tid, det tager for vandstanden at vende tilbage til det oprindelige niveau før nedbør, skyldes primært de forskellige højder af kapillærzonen samt de hydrauliske parametre for henholdsvis sandede og lerede jorde, hvilket resulterer i vidt forskellige hastigheder for vandets tilbagetrækning efter en nedbørshændelse. Dette skyldes sandsynligvis en mindre hydraulisk ledningsevne og en større vandretention ved markkapacitet for de mere lerede jorde sammenlignet med de mere sandede.

I figuren observeres ligeledes en stor variation i de beregnede halveringstider indenfor hver jordtype. Denne usikkerhed kan dels tilskrives identifikationen af enkeltstående pludselige stigninger i grundvandsspejlet som i nogen grad afhænger af de forudgående forhold og derfor ikke bidrager til analysen med et entydigt og uafhængigt forhold mellem nedbørsimpuls og vandstandsrespons. Dette er for eksempel tilfældet, når starten på en ny hændelse sker, før vandstanden er fuldt drænet tilbage til det oprindelige grundvandsniveau. Ikke desto mindre er forskellen mellem sandede og lerede jorde tydelig, hvilket understøtter ideen om en væsentligt langsommere afdræning af vand i lerede jorde sammenlignet med sandede jorde.



Figur 17: Halveringstider for afdræning opdelt efter jordtype.

Modellering af jordprofiler

Endimensional modellering på typejorde

I Ternært Vand anvendes Moving-Mean-Slope-modellen (MMS) (Moldrup 1989) til at modellere infiltrationen gennem den umættede zone i jordprofilen. Modellen inkluderer en endimensional numerisk beregning af vandindhold, jordens sugetryk og hydrauliske ledningsevne under både mættede og umættede forhold og er derfor ideel til at modellere de hydrauliske processer som er identificeret i ovenstående dataanalyse af grundvandspejlinger og laboratorieforsøg. Detaljerede beskrivelser af modellen kan findes i Sørensen og Hedevang (2023), Pedersen et al. (2024) samt Bombolt (2025).

I nedenstående afsnit præsenteres simuleringresultater fra opsætningen af MMS-modellen med de elleve standardjordteksturer. Da parameterverdier, selv inden for en jordteksturtype, kan variere betydeligt (f.eks. den mættede hydrauliske ledningsevne, som kan spænde over flere størrelsesordener), gennemføres simuleringerne ved anvendelse af litteraturverdier fra Tabel 1 som et "proof of concept" for at eksemplificere variationen mellem jordtyper. En mere grundig kalibreringsprocedure baseret på specifikke jorde vil kræve yderligere jordklassifikation samt direkte eller indirekte målinger af specifikke jordparametre baseret på felt- eller laboratorieforsøg. Dette udgør et oplagt fokusområde for fremtidige studier.

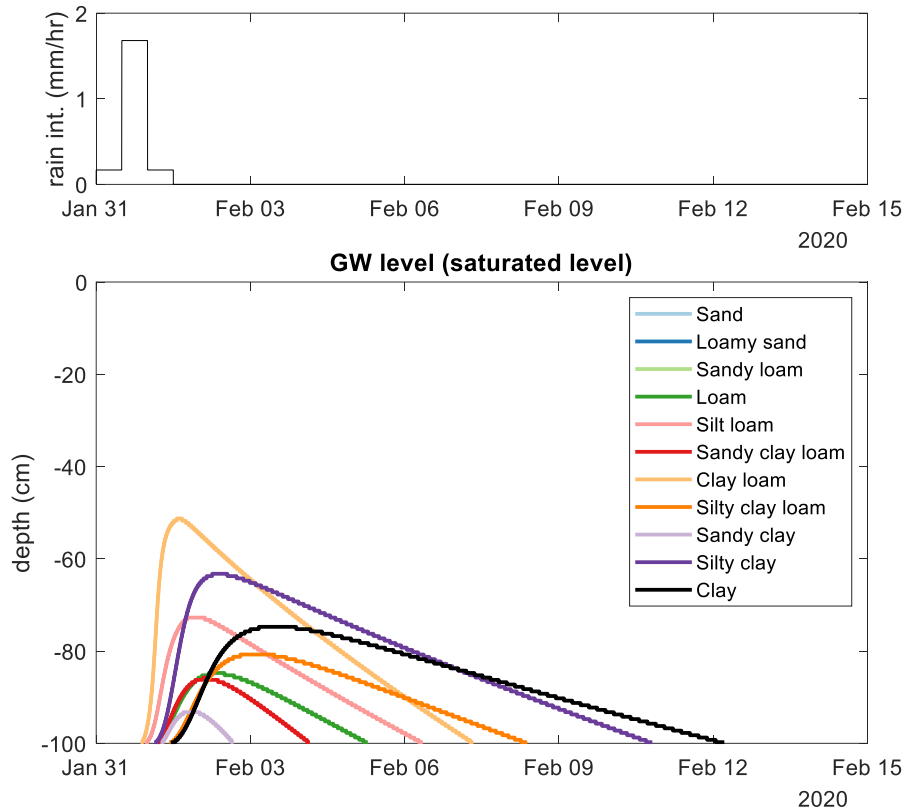
Tabel 1 Parametre brugt for 11 standard jordtyper (efter Clapp and Hornberger, 1978)

Soil no.	Soil texture	Porosity θ_s (cm ³ /cm ³)	Air Entry ψ_e (cm)	Campbell b b (-)	Sat. Hyd. Conductivity Ks (cm/min)
1	Sand	0.395	12.1	4.05	0.0434

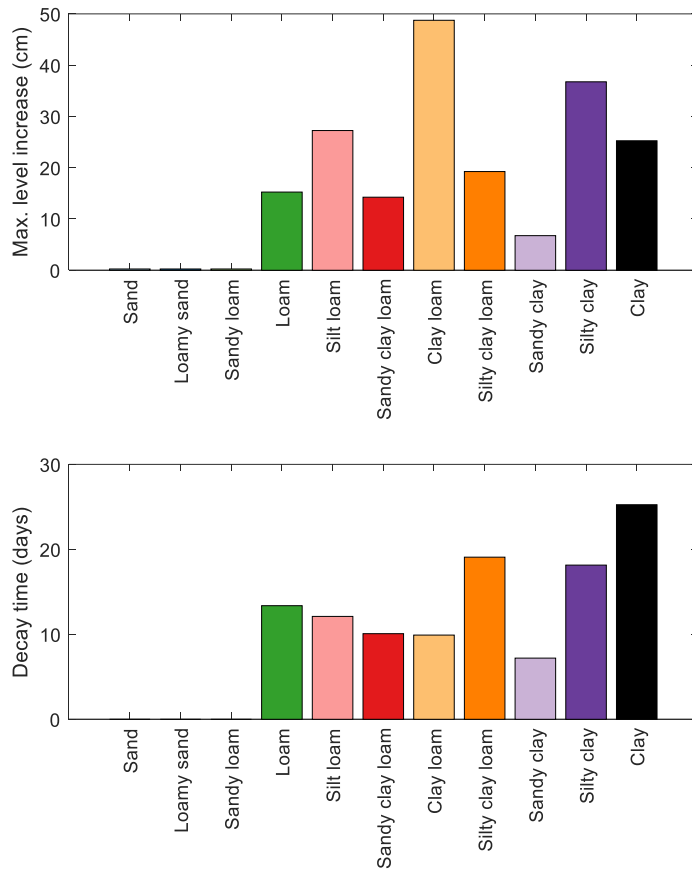
2	Loamy sand	0.410	9.0	4.38	0.0131
3	Sandy loam	0.435	21.8	4.90	0.0049
4	Loam	0.451	47.8	5.39	0.0031
5	Silt loam	0.485	78.6	5.30	0.0026
6	Sandy clay loam	0.420	29.9	7.12	0.0041
7	Clay loam	0.476	63.0	8.52	0.0023
8	Silty clay loam	0.477	35.6	7.75	0.0019
9	Sandy clay	0.426	15.3	10.40	0.0067
10	Silty clay	0.492	49.0	10.40	0.0013
11	Clay	0.482	40.5	11.40	0.0009

Figur 18 viser eksempler på simulering af grundvandsspejlets variation for de 11 jordteksturer baseret på en nedbørsimpuls på 25 mm over 12 timer. De mere lerholdige teksturer har både en større og mere abrupt stigning i grundvandsspejlet end de mere sandede jorde. Desuden er der en markant forskel på halerne efter de abrupte stigninger, dvs. hastigheden på afdræningsforløbet. For de lerholdige jorde tager det adskillige dage at vende tilbage til det oprindelige grundvandsspejl.

Abrupte stigninger i grundvandsspejl og afdræningsforløbets halveringstid er opsummeret på Figur 19 baseret på simuleringresultaterne.



Figur 18: Simulering af impuls (regn: 25 mm over 12 timer) og respons (grundvand) baseret på MMS modellen og 11 typejorde.



Figur 19: Pludselige stigninger i grundvandsspejl (øverst) og afdræningsforløbets halveringstid (nederst) baseret på MMS simuleringer.

Simuleringsresultaterne viser med al tydelighed og i lighed med målekampagnens resultater, at der er en væsentlig forskel i grundvandsresponsen afhængigt af jordteksturen. Det er med modellen muligt at reproducere både hurtige stigninger i grundvandsspejlet samt afdræningsforløbet, hvilket er et vigtigt resultat i fremtidig risikoanalyse af terrænnær grundvandsvariation.

Alt i alt viser laboratorieforsøg, målinger og simuleringer at det er særdeles vigtigt at inkludere jordmatricens kapillære kræfter i vurdering af det terrænnære grundvands dynamik. På grund af de næsten mættede forhold i kapillærzonen bliver den pludselige stigning i grundvandsspejlet efter regn særdeles høj, og i jorde med højt lerindhold tager det lang tid før at grundvandsspejlet igen falder til udgangsniveauet. I områder hvor det terrænnære grundvand højt og i niveau med afløbssystemer og dræn betyder processerne i den kapillære zone, at når de pludselige stigninger sker, kan afløbssystem og dræn gå fra at ligge i den umættede zone (hvor der ikke er indsivning) til den mættede zone (hvor der sker indsivning). Således kan denne dynamik forklare, hvorfor der sker indsivning til afløbssystemer og dræn – også lang tid efter regnens ophør.

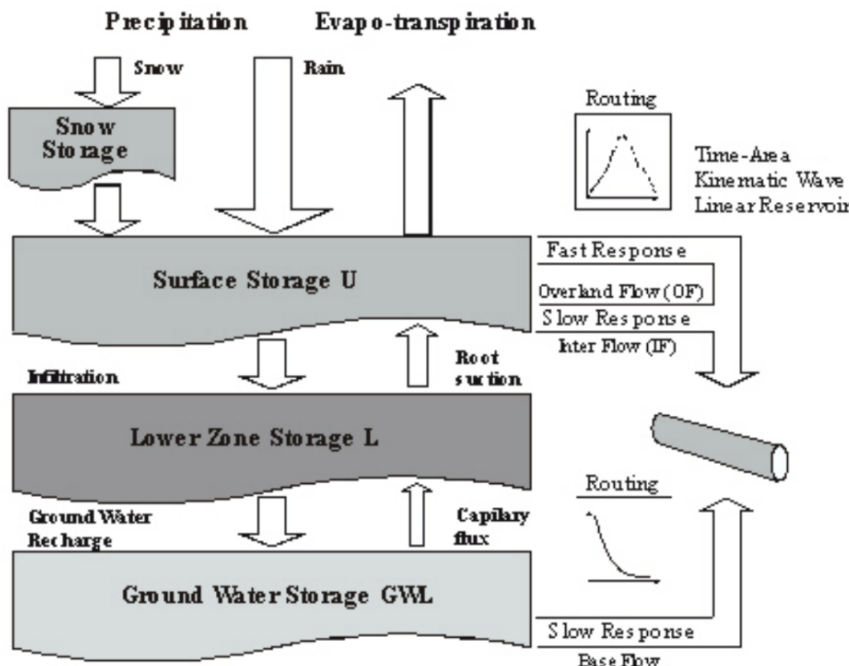
Opskalering til oplandsskala

For at kunne beskrive og analysere dynamikken af det terrænnære grundvandet på oplandsskala, samt dens påvirkning på afløbssystemerne, opstilles der en RDII-model. Der tages udgangspunkt i observationer fra det terrænnære grundvand, samt klimadata, og andre dataset som bl.a. jordartskort, ledningsoplysninger, arealanvendelse, højdemodeller. Formål med RDII-modellen er at kunne beskrive den hydrologiske påvirkning af afløbssystemet og afstrømning pga. klimapåvirkningen, som varierer i tid. Dette afsnit beskriver RDII-modellen for testområdet, samt følsomheder, og forbedringspotentiale for modellen. Derudover belyses der også potentiale for brug af pulsrespons-analyser for at beskrive dynamikken af det terrænnære grundvand og respons pga. klimapåvirkninger.

Generelt om RDII-modellen

RDII står for Rainfall Derived Infiltration and Inflow. RDII-modellen håndterer reservoir tilgangen, som modelkoncept (Nielsen & Hansen, 1973). Reservoir-modellen repræsenterer vandets bevægelse gennem systemet som en række "magasiner" (reservoirs), hvor hvert reservoir har en bestemt opholdstid og afstrømningskarakteristik. Modellen er opbygget med tre reservoirs, hvor vandet kan strømme imellem, som vises konceptuelt på Figur 20. Der identificeres tre måder, hvorpå afstrømning til afløbssystemet kan ske, hhv. overfladeafstrømning (hurtig infiltration, timer), infiltration fra den umættede zone (langsom, dage) og indsivning fra den vandmættede zone (grundvand, uger/måneder).

Ulempen med denne tilgang er, at reservoir-modellen er konceptuel og antager, at vandet bevæger sig gennem et begrænset antal "magasiner". Modellen bygger på empiriske antagelser og kalibrering frem for detaljerede fysiske ligninger, hvilket gør det sværere at inkorporere forskellige fysiske processer og deres dynamik i modellen.



Figur 20: Konceptuel model for RDII-modellen (DHI, 2025).

Caseområde: Beder, syd for Aarhus.

Beder er valgt som case, da det er en mindre afgrænset by i Aarhus Vands spildevandsopland. Der pumpes ikke spildevand fra andre byer til Beder, den ligger "øverst" i pumpehierakiet, hvilket gør det nemmere at afgrænse mængden af indsivning ift. oplandsareal. Der er kendte udfordringer med store mængder uvedkommende vand til den afskærende pumpestation. Beder er fuldt separatkloakeret, udført i 2015-2016. På Figur 21 vises modelområdet syd for Aarhus. Det er det samme område, som vises på Figur 2 med projektets målestationer.



Figur 21: Caseområde Beder syd for Aarhus (området markeret med lyseblå er opland til P164).

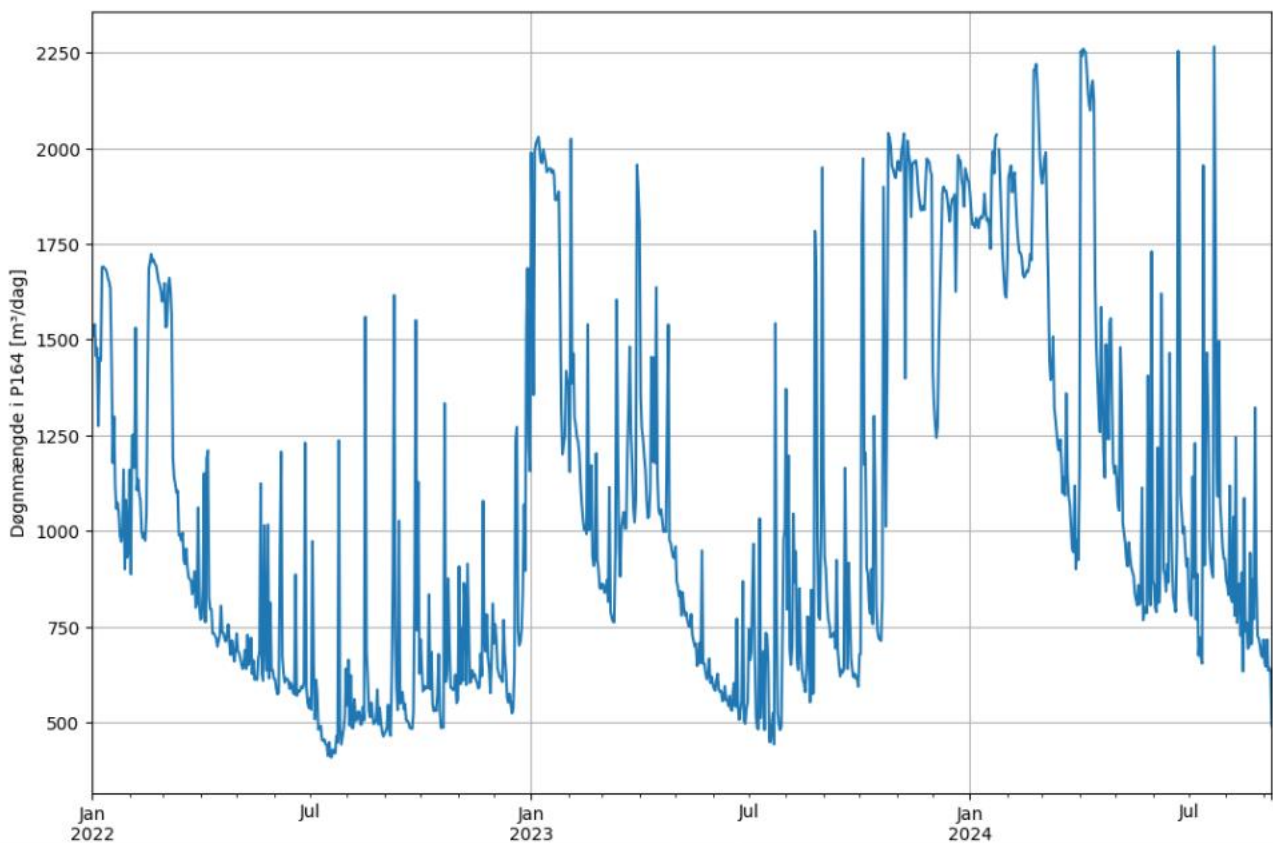
Den anvendte model er kraftigt simplificeret, for at kunne køre mange realisationer. Hele ledningsnettet inde i selve Beder by er fjernet, så der kun er den afskærende ledning fra byen ned til pumpestationen. Tabel 2 viser nøgletal for RDII-modellen for Beder.

I modellen anvendes både en Tid-Areal og RDII afstrømningsmodel. Tid-Areal-modellen anvendes til at simulere det fejlkoblede areal, som påvirker spildevandssystemet minutter efter nedbør. Denne andel er fundet ved hjælp af dekomponerings-kurverne, som er lavet ud fra analyse af pumpeflow ved metoden udviklet i DrainMan projektet (Miljøstyrelsen, 2021). Det er fundet, at oplandet til P164 (Figur 2) har en fejlkoblingsgrad på 6,2 %.

Tabel 2: Nøgletal for den anvendte model.

PE	4.198
Total areal	136,41 ha
Befæstet areal	56,86 ha
Fejlkobling	6,2 %

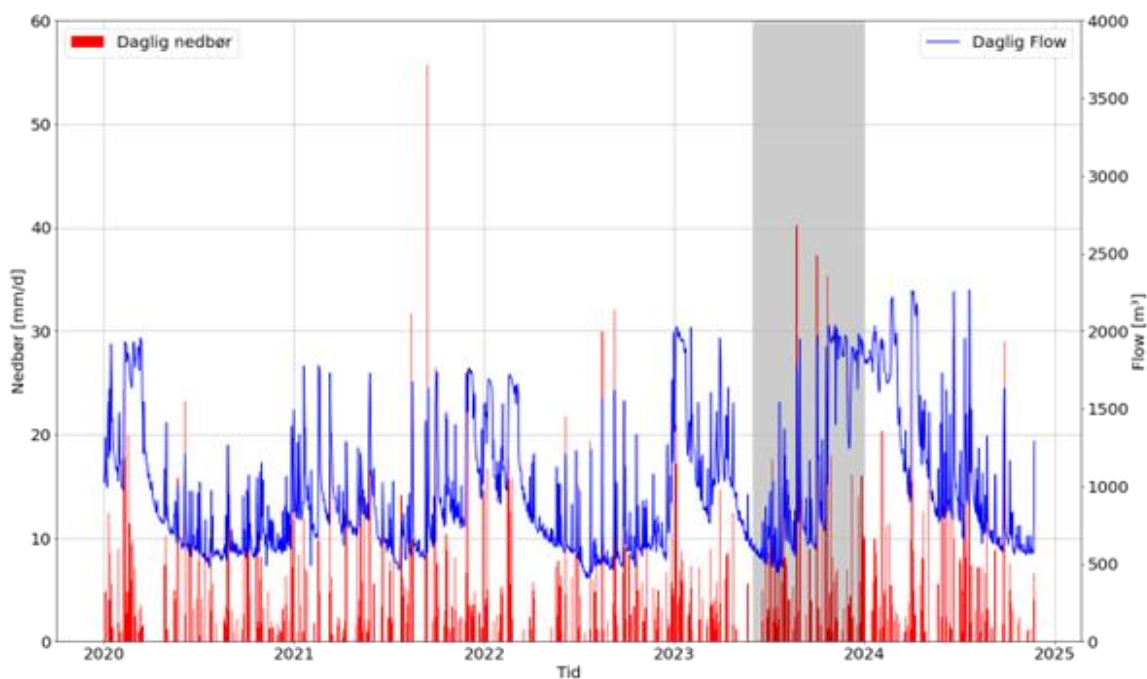
I Figur 22 ses det målte flow for perioden 1. januar 2022 til 1. oktober 2024 for pumpestation P164. Det ses at døgnmængderne varierer meget, med store korte peaks om sommeren og konstant højt flow om vinteren, som tager flere uger/måneder om at nå ned på det lave sommerniveau. Det antyder at oplandet både er påvirket af meget hurtig og meget langsomt udviklende uvedkommende vand. Fx fejlkoblinger af regnvand om sommeren og infiltration i hele vinterhalvåret.



Figur 22: Observationsdata for pumpestation P164. Det ses at pumpen er påvirket af uvedkommende vand.

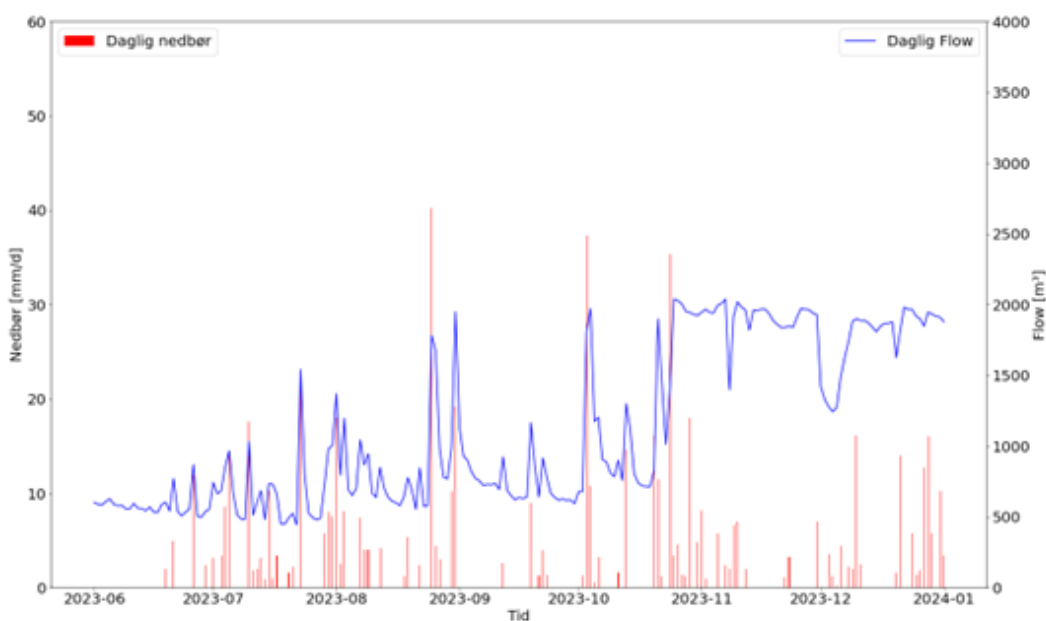
Udover observationsdata for pumpestationer er der opsamlet data fra en lokal nedbørsmåler. Data til analysen af korrelation og følsomhed er fra perioden 1. januar 2020 til 23. november

2024 og ses af Figur 23. Den blå linje viser det daglige pumpemængde fra pumpestationen i m³ og de røde søjler viser den daglige nedbør i mm/d.



Figur 23: Målt nedbør (rød) og afstrømning (blå) i perioden 2020-2025.

Figur 24 viser nedbør- og pumpedata fra 1. juni 2023 til 1. januar 2024, som også er afmærket med grå på Figur 23. Begge figurer viser, at der er god sammenhæng mellem afstrømningen til pumpestationen og målt nedbør.



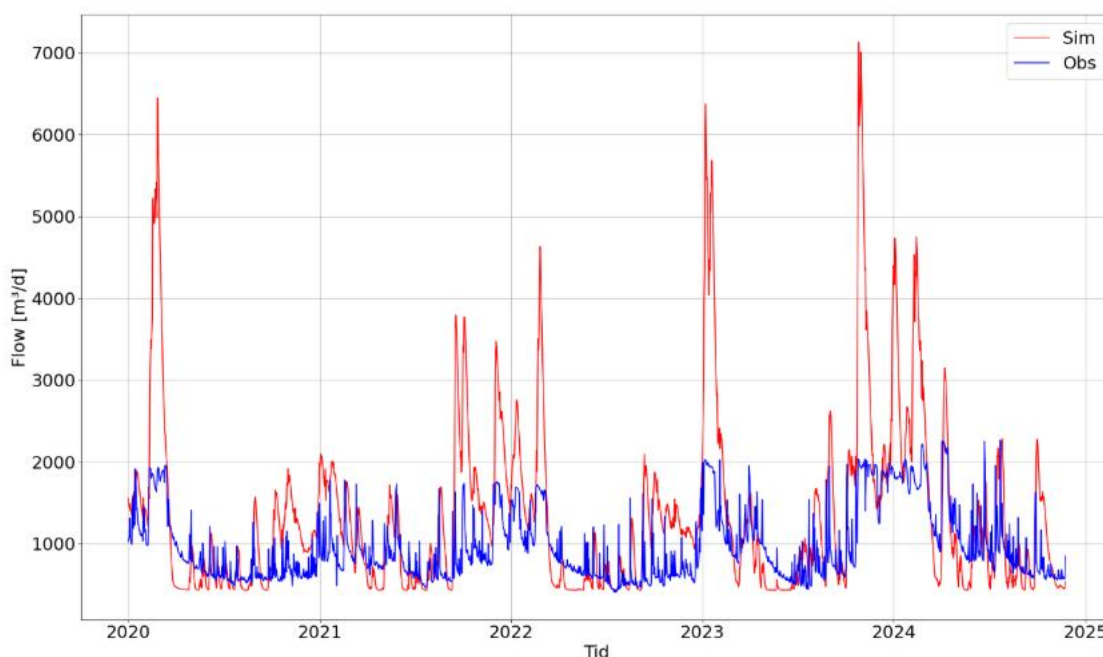
Figur 24: Målt nedbør (rød) og afstrømning (blå) i perioden juni 2023 – januar 2024.

Med nedbøren som input køres modellen med parameterværdierne der er vist i Tabel 3.

Tabel 3: Udgangspunktet for parameterværdierne til RDII modellen.

Parameter	Forkortelse	Værdi
<i>Maximum water content in surface storage</i>	U_{max}	48,8
<i>Maximum water content in root zone storage</i>	L_{max}	1245,3
<i>Overland flow runoff coefficient</i>	$CQOF$	0,25
<i>Time constant for routing overland flow</i>	CK_{12}	23,6
<i>Time constant for interflow</i>	$CKIF$	46,8
<i>Time constant for baseflow</i>	$CKBF$	183,3
<i>Topographical catchment area</i>	$AreaFrac$	0,6
<i>Difference between topographical and groundwater catchment</i>	$Carea$	13,3
<i>Hydraulisk reduktions faktor</i>	Hrf	0.61

Modelresultatet med startværdierne fra tabel ses på Figur 25. De simulerede værdier har en kling-gupta efficiency (kge) på 0.476, hvilket betyder at modellen præsterer utilfredsstillende og at gennemsnittet af observationerne er bedre til at estimere vandmængderne end modellen. Det ses, at de observerede værdier generelt er mindre og med lavere variation end de simulerede værdier. Det er særligt perioderne med høj afstrømning, som modellen ikke kan genskabe. Der simuleres afstrømning som når op til 6000-7000 m³/d, mens de observerede sjældent overstiger 2000 m³/dag.



Figur 25: Simuleret (rød) og observeret vandmængder fra ledningsnettet.

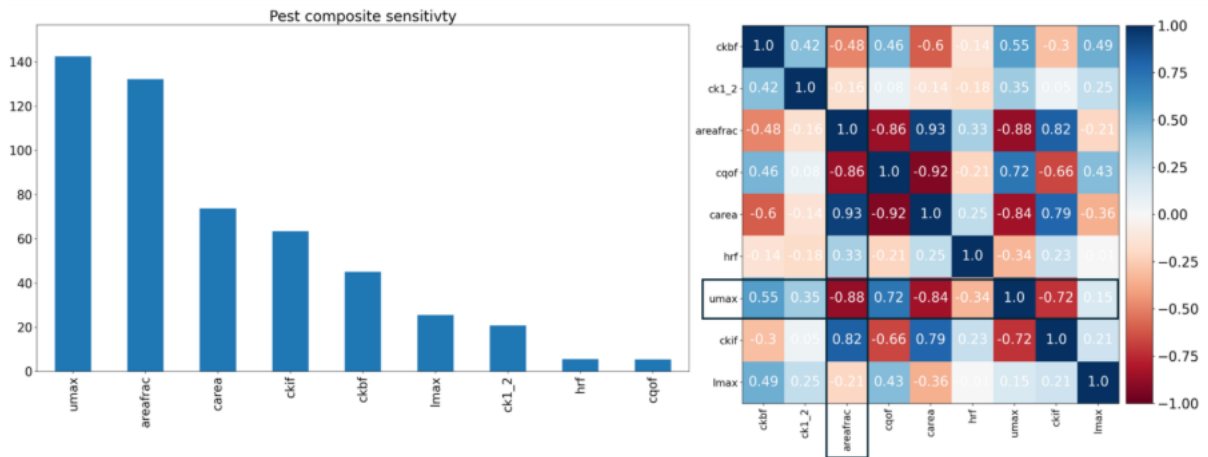
Følsomhedsanalyse

Parameterfølsomhed er, hvor meget et modelresultat ændrer sig, når værdien af en parameter ændrer sig. Det giver en indikation af, hvilke parametre der har størst indflydelse på modellens resultat.

Parameterkorrelation beskriver, hvor meget ændringer af flere modelparametre påvirker hinanden. Hvis to parametre har en høj korrelation, betyder det, at ændringer i den ene kan opvejes af ændringer i den anden. Derved vil mange kombinationer af parametre værdier give det samme modelresultat og når parametrene skal estimeres, vil der ikke være en entydig løsning.

Figur 26 (tv.) viser følsomheden af modellens parametre på at simulere den daglige afstrømning inden for hele perioden. Det ses at parametrene der styrer opmagasineringen på overfladen (UMAX) og det topografiske opland (arefrac) er de mest følsomme parametre.

Figur 26(th.) ses en korrelationsmatrice med variation fra -1 (rød) til 1 (blå), hvor der er højere korrelation tæt på grænserne og lav korrelation er tæt på 0 (hvid). Parametrene er sat op parvis, således de er parret med sig selv langs diagonalen og hvor side af diagonalen er ens. Det ses, at der er stærk korrelation mellem de mest følsomme parametre, hvilket betyder, at det er vanskeligt at skelne mellem effekten af parametrene og finde en unik løsning.



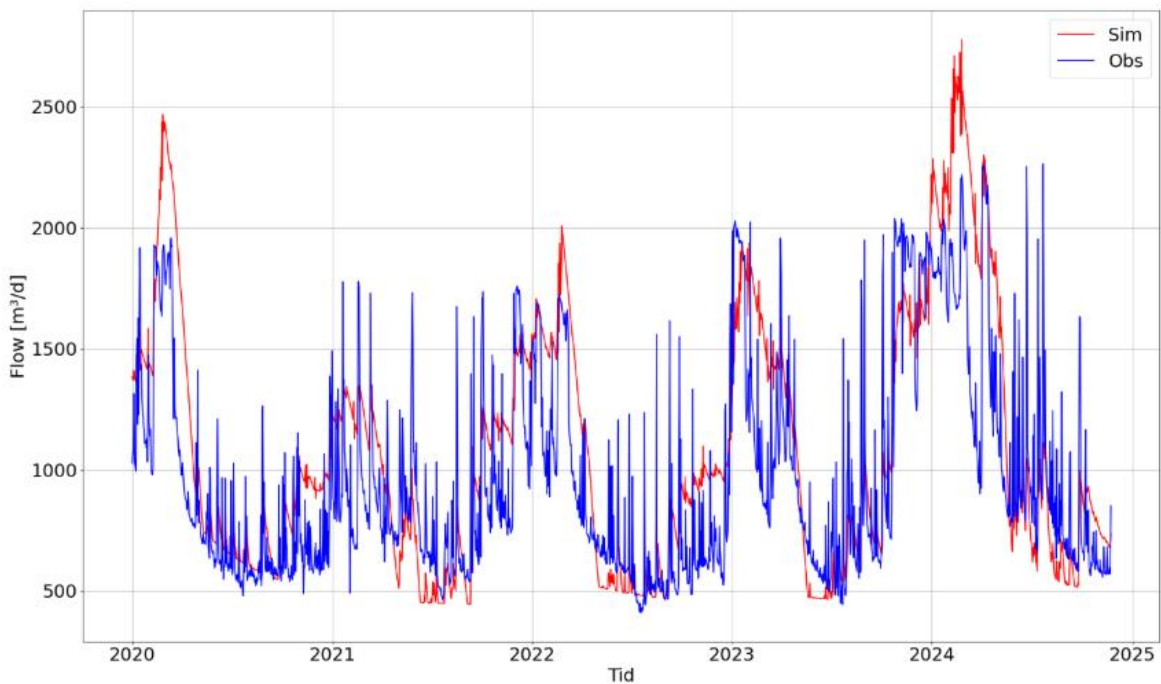
Figur 26: Parameterfølsomhed (tv.) og korrelationsmatrice (th.).

Opdatering af modellen, informeret af følsomhedsanalyse.

Der forsøges parameter inversion med programmet PEST++ (PEST++,2025) med observerede vandmængder som objektivfunktion og alle observationer er vægtet ensartet. Der benyttes singular value decomposition med en eigentresh på $1e-6$, og værdierne fra Tabel 3 benyttes som udgangspunkt.

På grund af den høje parameter korrelation er det ikke muligt at foretage inversion af modellen hvor alle parametrene inkluderes. Carea og Arealfrac fikses på startværdierne fordi de har høj indbyrdes korrelation og høj korrelation med umax og cqof.

Figur 27 viser simulerede (rød) og observerede (blå) vandmængder med den optimerede model. Den optimerede model har en KGE på 0.72 som indikerer at den kan genskabe sæsonvariation og noget af dynamikken i de observerede data. De høje simulerede værdier fra Figur 25 er reduceret betydeligt og variationen er mindre. Dog genskaber modellen ikke de kortvarige større udsving som ses i de observerede data og de simulerede værdier danner en mere udglattet kurve end de observerede data.

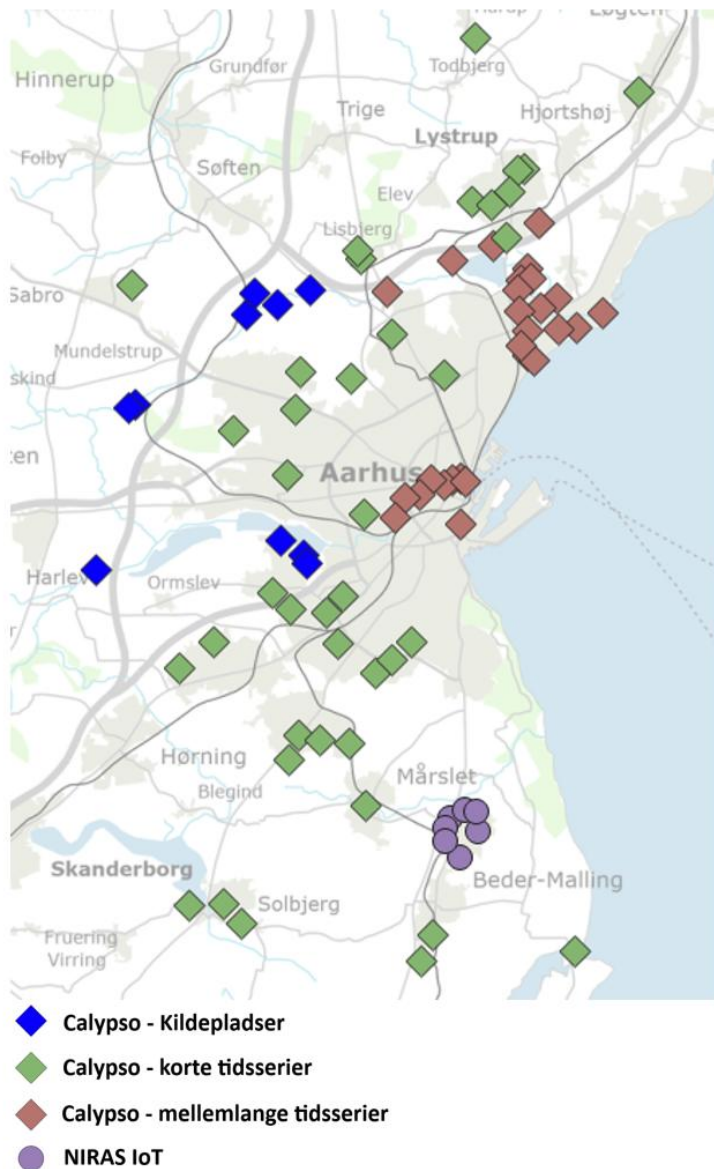


Figur 27: Simulerede (rød) og observerede (blå) vandmængder efter model inversion.

Tidsserieanalyse af terrænnært grundvand

Formål og datagrundlag

Med udgangspunkt i felt observationer og laboratorie analyser beskrevet i afsnit 'Målelokaltet' og 'Laboratieforsøg' er der opstillet en tidsseriemodel for de observerede data fra feltområdet i Beder. Formålet med tidsserieanalysen er at kvantificere, hvordan nedbør og fordampning driver variationer i terrænnært grundvand, og hvordan dette i praksis belaster afløbssystemet i dage til uger efter regn. Foruden de observationsdata der er indsamlet i de 7 observationsboringer i Beder, er de inddraget data fra yderligere 77 tidsserier fra monitoringsboringer inden for Aarhus Vands område (Figur 28): 10 loggere ved kildepladser, 40 loggere med kortere tidsserier samt 27 loggere placeret i Aarhus Midtby og Egå med mellemlange tidsserier. Klimadata (nedbør, potentiel fordampning) stammer fra DMI's 10-km grid, kombineret fra API (2010–2025) og arkiv (1990–2010).



Figur 28: Monitoringsboringer i hele Aarhus Kommune.

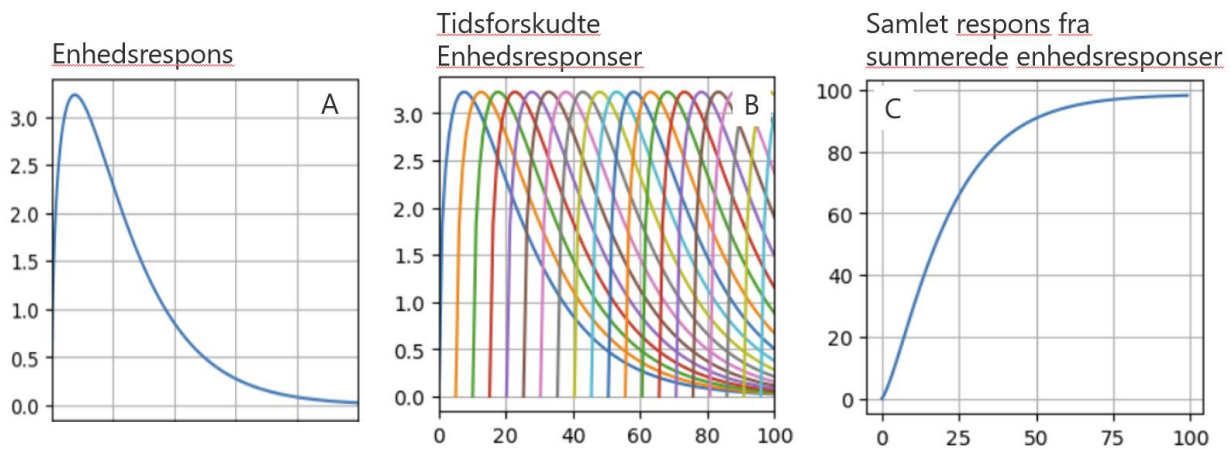
Metode: Responsfunktioner

Variationer i grundvandsstand modelleres som summen af effekter fra hydrologiske påvirkninger, især nedbør og fordampning, beskrevet via en skaleret gamma-responsfunktion. Responset for en enhedspåvirkning er:

$$\theta(t) = A \frac{t^{n-1}}{a^n \Gamma(n)} e^{-t/a}$$

hvor A skalerer responsens størrelse, n styrer forsinkelsen (umættet zone), og a styrer henfaldet (afdræningen). Den samlede grundvandsstand fremkommer ved konvolution af input-tidsserier med responsfunktionen og suppleres af en støjmodel (AR(1)/ARMA) for

autokorrelerede residualer samt en dæmpningsfunktion (tærskelkote + dæmpningsfaktor) for situationer tæt på terræn eller ved interaktion med utætte ledninger/dræn.



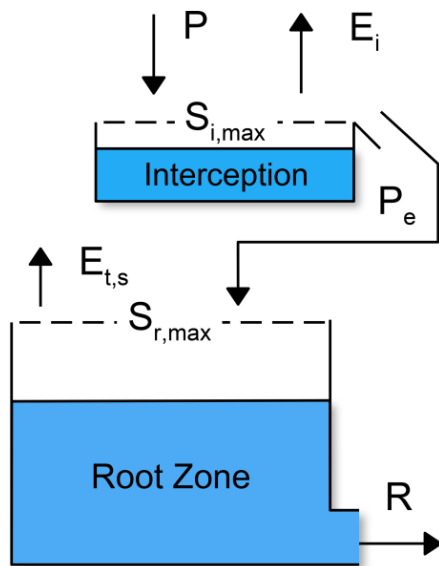
Figur 29: Eksempel på modellering af enhedsrespons (A) og samlet respons (C) som er en funktion af de summerede enhedsrespons vist på figur B.

Grundvandsdannelse: modelvalg

I dette projekt anvendes to tilgange til at beskrive grundvandsdannelsen, som driver variationerne i det terrænnære grundvand og dermed påvirker afløbssystemet: en ikke-lineær model ("flex-modellen") og en lineær differencemodel. Begge modeller kobles efterfølgende til den skalerede gamma-responsfunktion for at beskrive, hvordan grundvandsdannelsen resulterer i ændringer i grundvandsstand over tid. Valget af model er drevet af observationerne, og den model der resulterer i den bedste datatilpasning er anvendt. Dette er nærmere beskrevet i det følgende.

Ikke-lineær TFN (flex-modellen)

Den ikke-lineære TFN-tilgang repræsenterer en konceptuel beskrivelse af evapotranspirationen i de øverste jordlag og den resulterende grundvandsdannelse. Modellen anvender 2 lineære reservoirs, et interceptionsreservoir og et rodzone- /umættet- zone-reservoir. Nedbøren møder først interception (vegetation/overflade), hvorefter overskuddet tilføres rodzonen. Herfra kan det enten fordampe (aktuel evapotranspiration) eller drænes videre som grundvandsdannelse til magasinet. Fordampningen begrænses af tilgængelig jordfugt, hvilket giver en naturlig ikke-linearitet. Når systemet er tørt, reduceres grundvandsdannelsen, og når systemet er vådt, øges grundvandsdannelsen, men samtidig kan dræning/dæmpning indtræffe. I den implementerede flex-model indgår bl.a. følgende parametre (se også Figur 30): $S_{r,max}$ (maksimal opmagasinering i det dybe lineære reservoir), k_s (effektiv mættet hydraulisk ledningsevne i de øvre lag), γ (eksponent på vandmætningsgrad, der styrer graden af ikke-linearitet), k_v (skalering af potentiel fordampning til maksimal aktuel fordampning) og g_f (justering af "ekstra" evapotranspiration op mod potentiel fordampning). Kalibreringen foretages ved ikke-lineær least squares mod observerede tidsserier (SciPy least_squares).



Figur 30 Konceptuel model for modellen til beskrivelse af grundvandsdannelsen (fra 0)

Lineær differencemodel

Den lineære tilgang modellerer grundvandsdannelsen som et forenklet vandbalanceudtryk, hvor nedbør reduceres med en skaleret potentiel fordampning:

$$R = P - fE_p$$

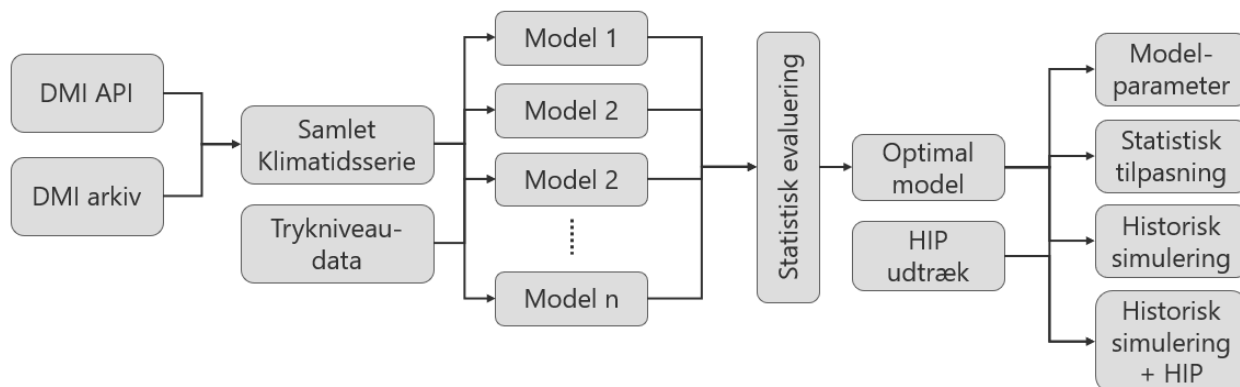
Her er f en kalibreret skaleringsfaktor, som effektivt repræsenterer "tab" til evapotranspiration, givet den aktuelle arealtype og klimatiske forhold. Modellen er transparent og robust ved begrænset datatilgængelighed og egner sig til hurtig screening og som reference mod mere komplekse opsætninger. Til gengæld beskriver den ikke eksplicit interception, opmagasiner og ikke-lineære fordampningsprocesser, og den kan derfor undervurdere eller overvurdere grundvandsdannelsen under perioder med henholdsvis tørke eller kraftig nedbør.

Praktisk anvendelse og samspil med responsfunktionen

I Ternært Vand er det primært flex-modellen som der anvendes, da den simplificerede lineære tilgang ikke er tilstrækkelig under de fleste forhold. Det endelige valg af den optimale model er dog defineret ud fra modellens evne til at reproducere de observerede tidsserier, hvor modellen med den bedste datatilpasning anvendes.

Implementering og kalibrering

Alle kombinationer af respons/recharge/støj/dæmpning (8 setups) er kalibreret med ikke-lineær least squares (SciPy least_squares). Flex-modellen er oftest valgt som optimal på tværs af serier.

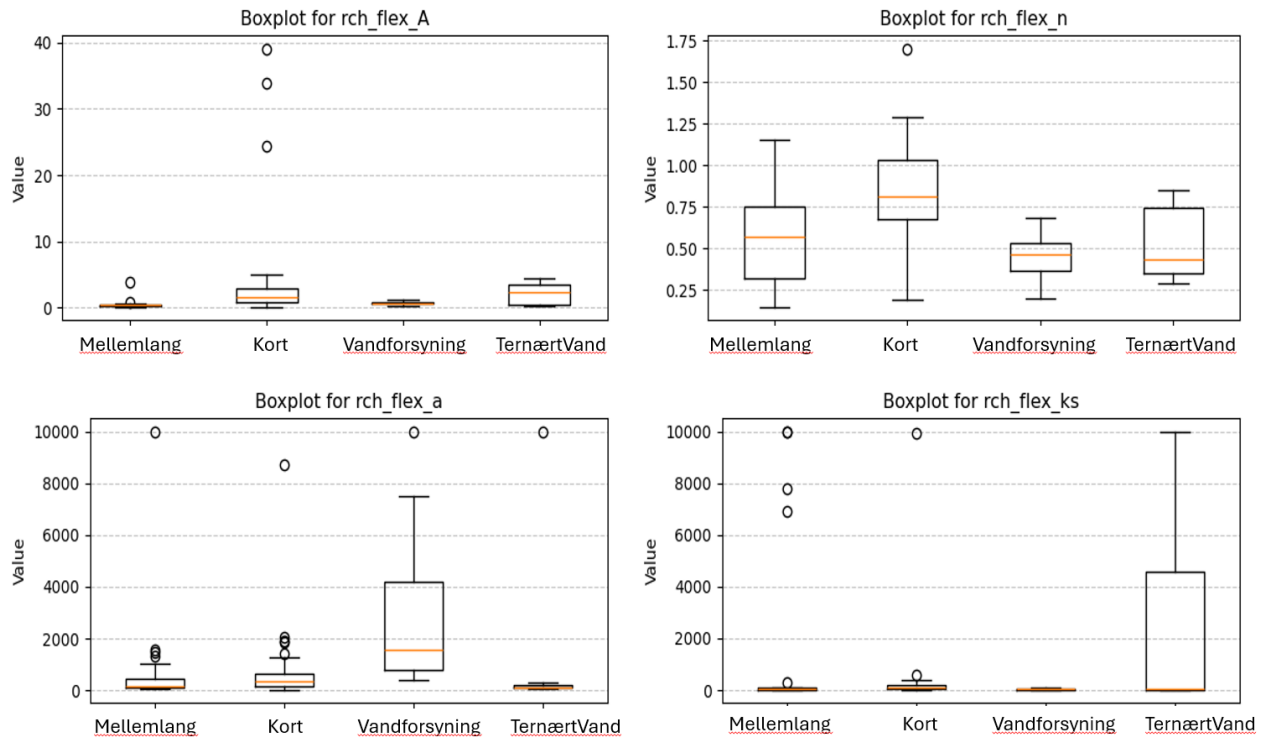


Figur 31: Flowchart for opstilling og kalibrering af tidsseriemodellen

På baggrund af analysen på tværs af alle tidsserier, kan der udledes følgende analyser for de modelparametre:

- Forsinkelse (n): typisk 0,25–1,25 døgn fra nedbør til toppunkt i terrænnært grundvand — robust estimeret i alle datasæt.
- Henfald (a): svag følsomhed — ofte overskrevet af nye hændelser; større usikkerhed.
- Magasin (srmax): markant lokal variation (geologi/arealanvendelse); åbent land tendens til lavere værdier end by.
- Ledningsevne (ks): medianer i den høje ende i forhold til de forventede hydrogeologiske forhold (fx ~40 m/d mellemlange tidsserier; ~34 m/d Vandforsyning; ~117 m/d korte tidsserier).
- Ikke-linearitet (gamma): afhængig af magasinfyldning — konsistent med observationer fra analyser af feltdata og laboratorieanalyser.
- Fordampningsskalering (kv): ofte > 1 i åbne/halvåbne områder; lavere i midtbyen (mere befæstet).
- Dæmpning (ThresholdTransform_1/2): aktiveres nær terræn eller ved interaktion med dræn eller utætte ledninger; indikerer fysisk cut-off i responset.

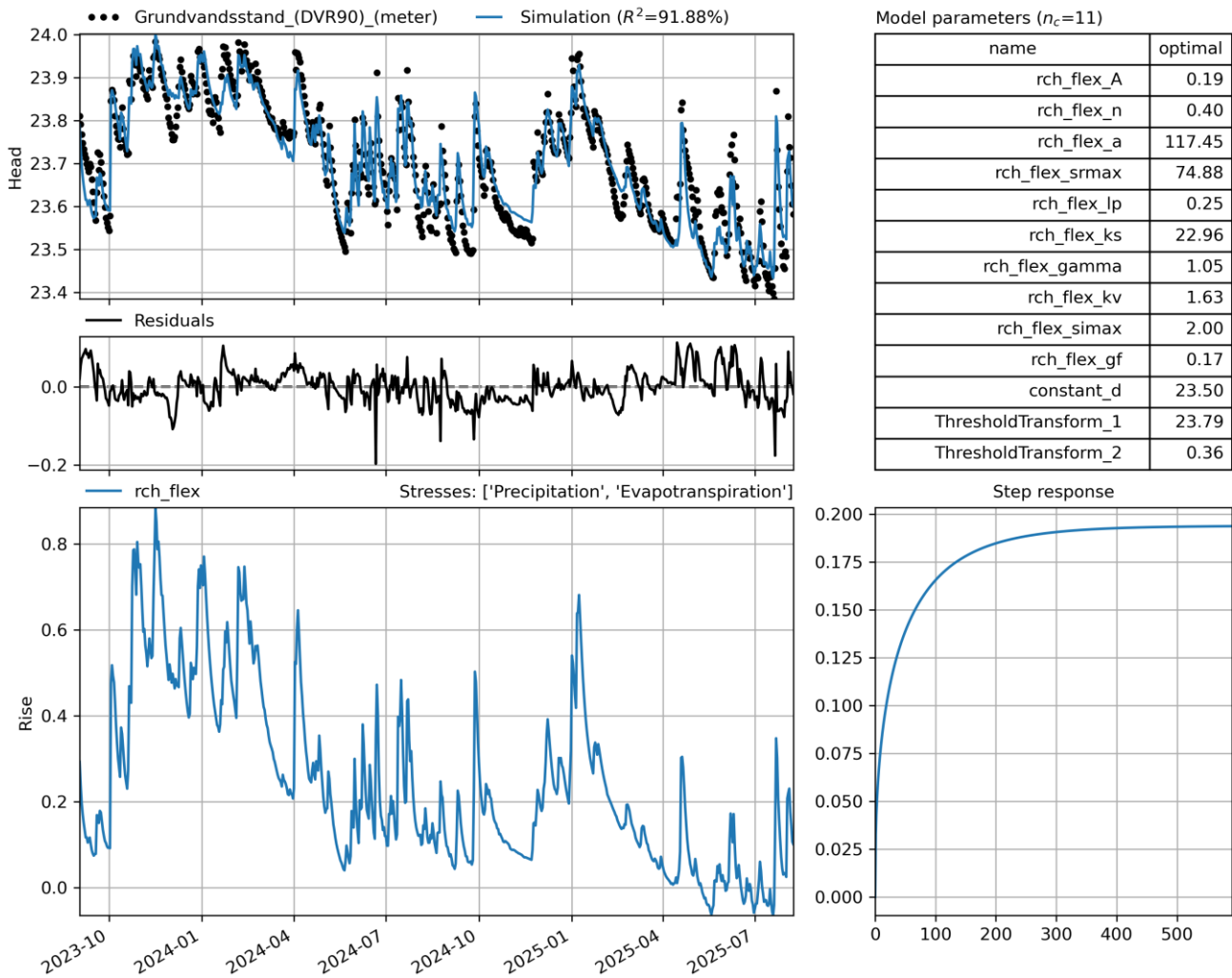
Der er udarbejdet boxplots for alle estimerede parameterverdier. Et udpluk af disse er vist på Figur 32.



Figur 32: Boxplots med eksempler på modelparametre

Eksempler: kalibrering og dynamik

Figur 33 viser resultaterne for modelleringen af boringen B10 opsat i Beder. Modellen har generelt en god beskrivelse af dynamikken i tidsserien, men kan have lidt svært ved at fange henfaldet på dele af kurven.

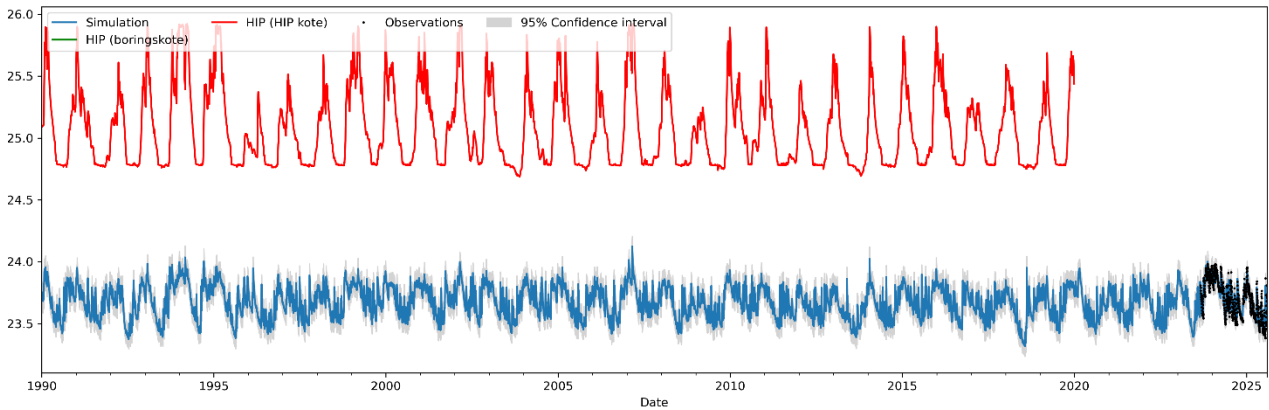


Figur 33: Simulerede responser for boringen B10 opsat i Beder. Simulerede responser er vist sammen med de resulterende modelparametre og residualer.

Hindcast (1990–2025) og sammenligning med HIP

For alle lokaliteter er udført hindcast (historisk periode fra 1990-2025) og sammenholdt med HIP. Figur 34 viser et eksempel på dette. Generelt viser tidsseriemodellen mere realistisk dynamik end HIP og mindre offset. Da udtrækket fra HIP er defineret i dybder (HIP afhænger stærkt af anvendt kote), skal dette konverteres til koter ved anvendelse af en terrænkote. Resultatet er dermed meget afhængigt af hvilken terrænkote der anvendes. I dette tilfælde er der anvendt henholdsvis koten for boringen samt terrænkoten fra beregningscellen

i HIP modellen. Tidsseriemodellen er i større omfang i stand til at simulere den observerede tidsserie.



Figur 34: Simulerede responser for boringen B10 opsat i Beder, sammenholdt med simuleringer udtrukket fra HIP.

Kobling til RDII-modellen og pumpedata (Beder-case)

Tidsserieanalysen underbygger RDII-indsigterne: hurtige (fejlkobling) og langsomme (umættet/mættet) komponenter. RDII-optimeringen gav KGE = 0,72 (mod -0,476 i startopsætning), hvor sæsonvariation genskabes men kortvarige peaks glattes — her bidrager tidsserie-responsfunktionen med forklaringskraft for kapillærstyrkede terrænnære variationer og dæmpning nær terræn.

Anbefalinger til anvendelse

1. Datakrav: Indsaml ≥ 1 års data der dækker varieret klima før anvendelse i konsekvensvurdering af bygninger/infrastruktur.
2. Modelpraksis: Brug flex-recharge + gamma som baseline; indfør støj- og dæmpningsmodul; begræns parametre (fx ks) til realistiske intervaller ved inversion.
3. Planlægning: Integrér terrænnært vand som selvstændig komponent i afløbsdimensionering og serviceniveau; kombiner RDII og tidsserie for robust peak- og sæsonbeskrivelse.

Konklusion

Projektet dokumenterer, at jordmatrixens kapillære processer er en hoveddriver for dynamikken i det terrænnære grundvand og dermed for regnbetinget indsivning i byernes afløbssystemer. Gennem kombinationen af feltmålinger, laboratorieforsøg, modellering og tidsserieanalyse viser projektet, at selv moderate regnhændelser kan føre til **store og hurtige stigninger i grundvandsspejlet**, fordi kapillærzonen allerede står nær ved mætning. Der kan altså ikke entydigt peges på grundvandet eller nedbør som hovedårsag til indstrømning i kloaksystemet. Det er en kombination af begge faktorer drevet af de kapillære kræfter.

De centrale resultater kan sammenfattes i fem hovedindsigter:

1. Kapillærzonen skaber kraftige stigninger i grundvandsspejlet

Millimeter regn bliver til centimeter grundvandsstigning – særligt i lerede jorde, hvor det kapillære sug er højt.

2. Langsom afdræning i lerede jorde giver vedvarende belastning

I disse områder tager det dage til uger, før niveauet falder, hvilket forklarer de lange perioder med forhøjet indsivning efter regn.

3. Afløbssystemer skifter midlertidigt fra umættet til mættet zone

Når rør og dræn ligger i den dynamiske zone, kan selv små ændringer i vandstand aktivere indsivning gennem utætheder eller drænforbindelser.

4. Modellering bekræfter observationerne

Modellerne viser, at variationer i jordtekstur, mætning og kapillær effekt er afgørende for at kunne genskabe den langsomme vintertilstrømning og de hurtige peaks efter regn.

5. Tidsserieanalyse viser, at terrænnært grundvand er en styrende komponent

De estimerede responsfunktioner og flexmodeller viser, at variationen i terrænnært vand sker på tidsskalaer, der matcher de vedvarende belastninger på pumpestationerne.

Samlet set viser projektet, at terrænnært grundvand – og særligt den kapillære zone – udgør en *hidtil undervurderet mekanisme* bag indsivning af grundvand i afløbssystemer. Dette kræver en ændret praksis i både planlægning, modellering og regulering. Projektets metoder og resultater giver et nyt, databaseret grundlag for at:

- forstå og forudsige påvirkningen af afløbssystemer,
- prioritere klimatilpasning,
- udvikle screenings- og beslutningsværktøjer,
- samt målrette investeringer, hvor de har størst effekt.

Projektet peger dermed mod en mere **integreret og procesbaseret** tilgang til håndtering af terrænnært grundvand, hvor samspillet mellem nedbør, jordens kapillære egenskaber, grundvandsdynamik og afløbssystemer behandles samlet frem for i separate faglige siloer. Denne tilgang muliggør en mere retvisende beskrivelse af de mekanismer, der driver indsvivning af uvedkommende vand, og skaber et væsentligt bedre grundlag for både planlægning og drift.

Projektet bidrager samtidig med konkrete værktøjer og metoder, som kan implementeres direkte i praksis, herunder:

- tidsseriemodeller og responsfunktioner til analyse og forudsigelse af terrænnært grundvands dynamik,
- forbedrede konceptuelle og numeriske modeller til beskrivelse af samspillet mellem umættet zone og afløbssystem,
- parameterisering og anvendelse af RDII-modeller, der i højere grad afspejler de fysiske processer,
- datadrevne metoder til kobling af målinger, jordegenskaber og klimadata,
- samt grundlag for udvikling af screenings- og beslutningsværktøjer til prioritering af indsatsområder.

Samlet set giver dette vandsektoren mulighed for at gå fra en afhjælpende og konsekvensbaseret håndtering af uvedkommende vand til en mere proaktiv og procesbaseret tilgang, hvor indsatsen målrettes de områder og mekanismer, der har størst betydning. Dermed styrkes både beslutningsgrundlaget, investeringsprioriteringen og robustheden over for fremtidige klimaændringer, hvor stigende nedbør og højere grundvandsspejl forventes at forstærke problemstillingen yderligere.

Litteraturliste

Bomholt, J. (2025). Kapillarzonens effekt på grundvandsstigninger og uvedkommende vand i urbane områder. Aalborg Universitet, Vand og Miljø. https://kdbk-aub.primo.exlibrisgroup.com/permalink/45KBDK_AUB/a7me0f/alma9922252752405762

Clapp, R.B., Hornberger, G.M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research* 14, 601 – 604. doi:10.1029/WR014i004p00601.

Collenteur, R. A., Bakker, M., Klammler, G., and Birk, S. (2021). Estimation of groundwater recharge from groundwater levels using nonlinear transfer function noise models and comparison to lysimeter data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 2931–2949, <https://doi.org/10.5194/hess-25-2931-2021>

Collenteur, R.A., Bakker, M., Caljé, R., Klop, S.A., & Schaars, F. (2019). Pastas: open source software for the analysis of groundwater time series. *Groundwater*. doi:10.1111/gwat.12925

DHI. (2025). DHI Reference Manual til Mike 1D: DHI Simulation Engine for 1D river and urban modelling. Version 2025

Miljøstyrelsen. (2021). Drainmain – Uvedkommende vand og det intelligente spildevandssystem. Bassø, L., Rasmussen, M., Lindberg, S., Bak, D.K., Pjengaard, O.H., Pourmoayed, R., Schou, C. Simonsen, P.D., Kraglund, L.L., Ploug, S.B., ISBN: 978-87-7038-341-7.

Moldrup, P., Rolston, D., Hansen, J.A. (1989). Rapid and numerically stable simulation of one-dimensional, transient water flow in unsaturated, layered soils. *Soil Science* 148, 219 – 226. doi:10.1097/00010694-198909000-00009.

Nielsen, S.T., Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Hydrology Research*. 1 June 1973; 4 (3): 171–190. <https://doi.org/10.2166/nh.1973.0013>

Pedersen, E. B., Nørlund, M. í D., & Pedersen, G. D. (2024). Development of a screening tool for risk assessment of groundwater infiltration into sewer systems - including capillary fringe induced rapid groundwater rise during rain. Aalborg Universitet, Vand og Miljø. https://kdbk-aub.primo.exlibrisgroup.com/permalink/45KBDK_AUB/a7me0f/alma9921780705905762

PEST++ Development Team, PEST++ - Software Suite for Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, Management Optimization, and Sensitivity Analysis, Version 5.2.

SciPy least_squares dokumentation:

https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.least_squares.html

Sørensen, F. K. B. & Hedevang, B. T. (2023) Indsivning af uvedkommende vand i afløbssystemer - Numerisk og eksperimentel bestemmelse. Kandidatspeciale Aalborg Universitet, Vand og Miljø. https://kdbk-aub.primo.exlibrisgroup.com/permalink/45KBDK_AUB/a7me0f/alma9921565428505762

Bilag

Grundvandspejlinger og lokalgeologi

