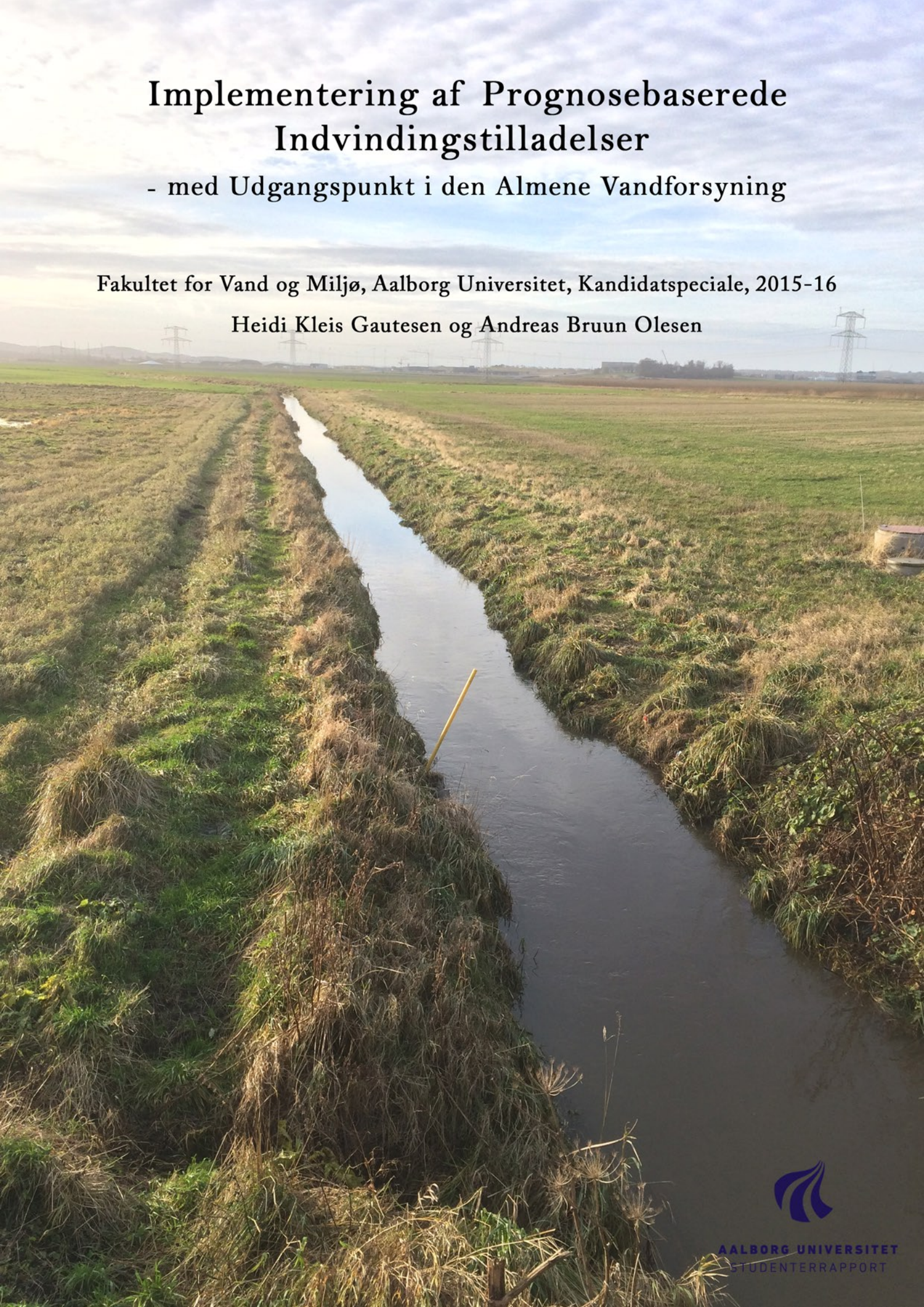
Implementering af Prognosebaserede Indvindingstilladelser

- med Udgangspunkt i den Almene Vandforsyning

Fakultet for Vand og Miljø, Aalborg Universitet, Kandidatspeciale, 2015-16

Heidi Kleis Gautesen og Andreas Bruun Olesen



AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

School of Engineering and Science
Sofiendalsvej 9
9000 Aalborg

Titel:

Implementering af prognosebaserede indvindingstilladelser - med udgangspunkt i den almene vandforsyning.

Projecttype:

Kandidatspeciale (45 ECTS).

Projektperiode:

1. september 2015 - 1. juni 2016

Studerende:

Andreas Bruun Olesen

Heidi Kleis Gautesen

Vejledere:

Ole Munch Johansen
Jacob Birk Jensen

Oplagstal: 5
Sidetal: 100
Bilagsantal: 23

Synopsis:

I den indledende analyse er forskellige vandløb inden for Aalborg Kommune karakteriseret. Samtidig er pejleserier fra Aalborg- og Rebild Kommune indhentet. En korrelationsanalyse er udført for, at belyse sammenhængen mellem pejledata fra enkelte måneder og årsminimumsvandføringer. Korrelationsanalysen viser nogle uventede tendenser. Det konkluderes at den årlige variation i grundvandsstanden har ligeså stor betydning for årsminimumsvandføringen som grundvandsdannelsen i foråret. En prædiktionsmodel til prædiktion af årlige minimumsvandføringer er udfærdiget, med tilfredsstillende resultater. For at belyse om en ny metode til bestemmelse af vandløbs økologiske indeks kan indgå i en prædiktionsmodel, belyses denne metode ligeledes, det konkluderes at usikkerhederne forbundet med denne metode er for store. En Mike SHE model benyttes til, at bestemme hvor lang tid der går fra en indvinding ændres, og til denne ændring kan observeres i vandløbets vandføring. Denne analyse ligger til grund for udførelsen af simple modeller, der kan beskrive påvirkningen på Romdrup Å fra hver enkelt kildeplads i oplandet. Slutteligt gennemregnes en række eksempler med formålet at belyse potentialet for denne metode. Det bevises at der kan indvindes mere vand i nogle år, og mindre i andre. Samlet giver dette koncept mulighed for at indvinde en hel del mere vand, uden at påvirke den økologiske tilstand i vandløb, estimeret vha. medianminimumsvandføringen.

Forord

Nærværende rapport er udarbejdet af to specialestuderende på 9. - 10. semester, Vand og Miljø. Rapporten er udarbejdet i perioden fra den 1. september 2015 til 1. juni 2016.

Læsevejledning

For at sikre en fuld forståelse ved gennemlæsning af nærværende rapport, forudsættes det, at læseren har et grundlæggende kendskab til hydrologi og limnologi. Kildehenvisninger angives efter Harvard-metoden, hvilket indebærer, at kilder er anført efter den tilhørende tekst, medmindre kilde er angivet først i kapitlet. Hvis kildehenvisningen er inden et punktum, indebærer det at kilden tilhører sætningen, hvori den er placeret. Hvis kilden står efter et punktum, tilhører kilden det foregående afsnit. En kildehenvisning indeholder efternavnet på kildens forfatter, samt udgivelsesdato. Ved kilder med mere end én forfatter, vil henvisningen indeholde efternavnet på den første forfatter efterfulgt af *et.al.* Et eksempel på en kildehenvisning med mere end én forfatter: [Andersen et al., 2001]

Kildehenvisninger til tabeller og figurer vil som alt øvrigt tekst blive angivet efter Harvard-metoden. Tabeller og figurer uden kildehenvisning er egenfremstilling. Der refereres til tabeller og figurer vha.: "Tabel" eller "Figur" efterfulgt af et nummer. Figurer redigeret ift. den originale er markeret med "*".

For yderligere kildedokumentation henvises der til litteraturlisten.

Elektronisk appendiks kan ses og downloades på linket: [`kortlink.dk/mcwu`]. Her er det også muligt at downloade en pdf med den fulde rapport.

Rapporten er udarbejdet af:

Heidi Kleis Gautesen	Andreas Bruun Olesen

Abstract

This project report is focussed on the possibility of implementing forecast based groundwater abstraction. The idea is that forecast based groundwater abstraction should be a tool for the municipalities to be better at fulfilling requirements in the Water Framework Directive. This directive prescribes that groundwater abstraction should not influence the body of groundwater to an extent that negatively affect the ecological status of streams and other nearby ecosystems. This report provides a method for the water supply to assess where water abstraction will have the smallest environmental impact, adjusting the groundwater abstraction accordingly. This also means that the water supply is able to abstract more groundwater in periods where streams and other wet ecosystems are not threatened.

In the preliminary analysis, different streams in and near Aalborg municipality is characterized, and groundwater potential data from Aalborg and Rebild municipality is extracted. The data is then sorted and the data which accommodates stated quality criteria can be used further on in the analysis. In the main analysis, a correlation analysis is to illuminate the connection between groundwater potential from separate months and the yearly minimum flows in streams. The analysis shows some unexpected tendencies, which is further analysed. It is concluded that the yearly variation in groundwater potential have equal impact on the yearly minimum flow, than the groundwater recharge in the spring alone.

This knowledge provides the basis of making a prediction model, which is able to predict the yearly minimum flow based on groundwater potential. A validation shows that the model is fairly precise. To illuminate if a new method, described in the second management cycle of the Water Framework Directive, for calculation of the ecological status of streams can also be covered by a prediction model, this method is also analysed. It is concluded based on this analysis that this method is associated with great uncertainties, and therefore cannot be covered by a prediction model.

A Mike SHE model is used to figure out exactly how much time it takes before a groundwater abstraction is adjusted, and to this adjustment can be observed in the stream. This information is used to fit simple models, which is able to describe the influence from an adjusted groundwater abstraction on the covered streams.

At last some different scenarios is calculated with the purpose of demonstrating the potential of forecast based groundwater abstraction. It is proven that some years allow for an increased groundwater abstraction, while others don't. In total this concept allows for a considerable increase in groundwater abstraction, without influencing the ecological status of streams, estimated by median minimum flow.

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1 Indledning **1**

Kapitel 2 Problembeskrivelse **3**
2.1 Problemformulering 3

Kapitel 3 Påvirkning af vandløb ved vandindvinding **5**
3.1 Grundlæggende teori om grundvandssystemer 5
3.2 Påvirkning af vandføring ved vandindvinding 8
3.3 Konsekvenser ved påvirkning af vandløb og vådområder 10
3.4 Mulighed for at implementere variable indvindingstilladelser 14

Analyse **16**

Kapitel 4 Analyse af vandførings- og pejledata **17**
4.1 Udvælgelse af vandføringsdata 17
4.2 Udvælgelse af pejledata 20
4.3 Opsamling 21

Kapitel 5 Korrelationsanalyse **23**
5.1 Korrelation af årsminimumsvandføring med pejledata 23
5.2 Opsamling 30

Kapitel 6 Analyse af tendenser fra korrelationsanalysen **31**
6.1 Påvirkning af grundvandspotentiale fra vandindvinding 33
6.2 Undersøgelse af specifikke pejleserier 34
6.3 Undersøgelse af pejleserie fra Volsted Plantage 37
6.4 Opsamling 39

Kapitel 7 Prædiktion af årsminimumsvandføringen **41**
7.1 Forundersøgelse ift. valg af prædiktionsmodel 41
7.2 Prædiktionsmodel baseret på 3 pejlinger 43
7.3 Nedbørs påvirkning af årsminimumsvandføring 47
7.4 Opsamling 50

Kapitel 8 Parameteranalyse - Vandplan 2 Metode **53**
8.1 Parametre i vandplan 2 metoden 53
8.2 Parameteranalyse 56
8.3 Opsamling 60

Modellering **63**

Kapitel 9 Mike SHE modellering **63**

9.1 Valg af dræntidskonstant 64
9.2 Opsamling 67

Kapitel 10 Bestemmelse af responstiden ift. kildepladsers påvirkning af vandløb 69
10.1 Screening for kildepladser i modelområdet 69
10.2 Romdrup Å 70
10.3 Andre vandløb i model området 76
10.4 Vurdering af kildepladsernes påvirkning 82
10.5 Opsamling 84

Resultater og konklusion 86

Kapitel 11 Eksempler på anvendelse af prognosebaseret indvinding 87
11.1 Eksempel 1: Kildeplads i Klarup 88
11.2 Eksempel 2: Flere kildepladser og vandløb 91
11.3 Opsamling 95

Kapitel 12 Konklusion 97

Litteratur 99

Bilag A Elektronisk Appendiks
A.1 Script til baseflow separering og beregning af vandløbs parametre 101
A.2 Scripts til analyse af pejledata 101
A.3 Plots med antal pejlinger om året 101
A.4 Script til analyse af pejledata fra Voldsted Plantage 101
A.5 Scripts til udførelse af regressionsanalyse 101
A.6 Excel ark med resultater fra signifikansanalyse 101
A.7 Script til analyse af regn 101
A.8 Excel ark med dræntidskonstant resultater 101
A.9 Excel ark med alle vandbalance resultater 101
A.10 Eksempel 1 - Excel ark med 1 kildeplads 101
A.11 Eksempel 2 - Excel ark med flere kildepladser og vandløb 101

Bilag B Karakterisering af Vandføring
B.1 Digital filter method 103

Bilag C Korrelation af komplette datasæt

Bilag D Kommentarer til korrelationsanalyse
D.1 Lindenborg Å 107
D.2 Romdrup Å 109

Bilag E Regressionsmodel

Bilag F Nedbørsdata
F.1 Regressionsmodel med nedbør 116

F.2 Undersøgelse af sammenhæng mellem årsminimumsvandføring og nedbør vha. scatterplots 117

Bilag G Test af modelfit

Bilag H Modelfits til Hølbækken, Indkildestrømmen, Landbækken og Vårst Hovedgrøft

H.1 Hølbækken 121
H.2 Indkildestrømmen 121
H.3 Indkildestrømmen 122
H.4 Vårst Hovedgrøft 123

Indledning 1

Indvinding af grundvand er en naturlig, integreret og vigtig del af et moderne samfund. Grundvand bruges til mange ting, heriblandt vandforsyning til almindelige borgere, markvanding og industri. En af følgeeffekterne ved indvinding af grundvand er den direkte påvirkning af vandløb og våde områder, hvor udstrømning fra grundvandsmagasiner ofte udgør en stor del af den totale vandføring. Indvinding af grundvand kan altså begrænse vandføringen i vandløb, og endda i nogle tilfælde være direkte årsag til, at mindre grundvandsfødte vandløb risikerer at tørre ud.

I Danmark oppumpes drikkevand fra vandreservoirer i jorden, og vandet behandles i de fleste tilfælde kun ved simpel vandbehandling, før det distribueres ud til forbrugeren. Den geologiske lagdeling i store dele af Danmark, medvirker til at vand der falder som regn, gennemgår en lang rensningsproces på vej mod de dybe grundvandsmagasiner, hvorfra en del pumpes op og benyttes som drikkevand. Alligevel er grundvand af god kvalitet en begrænset ressource. Der bliver mindre af det "rene" grundvand, da uønskede komponenter som nitrat og pesticider fra landbruget, fortsat er mere tilstedeværende i grundvandsressourcen. [Danmarks Naturfredningsforening, 2010] Beskyttelsen af grundvandsressourcen er en mærkesag i Danmark, og kvaliteten af grundvandet ønskes derfor bevaret. For at bibeholde grundvandskvaliteten i Danmark, er en fremtidig handleplan for yderligere beskyttelse af vores grundvandsressource nødvendig. [Danmarks Naturfredningsforening, 2010]

I dag må flere boringer lukkes ned, idet grænseværdier for tilstedeværende forureningsstoffer overskrides [Miljø- og Fødevareministeriet, Naturstyrelsen, 2013], hvilket efterlader et behov for udarbejdelse af nye kildepladser eller en øget indvinding på eksisterende kildepladser. Øget indvinding er i visse områder ikke en oplagt mulighed, da dette kan introducere andre udfordringer idet våde, sårbare naturområder som mindre vandløb og våde områder risikerer at tørre ud ved overindvinding, samtidig med at en dårligere økologisk tilstand risikeres i øvrige vandløb, hvilket er i konflikt med miljømål for vandløb.

I Danmark er det i de fleste tilfælde større forsyninger som distribuere vandet til forbrugeren, de ønsker mere fleksibilitet ift. indvindingstilladelserne, for at være bedre rustet til de fremtidige udfordringer. En løsningsmodel til fremtidig beskyttelse af grundvandet både kvalitativt, men også kvantitativt er nødvendig. Derfor undersøges, i nærværende rapport, muligheden for at implementere tidsvarierende indvindingstilladelser.

Problembeskrivelse 2

Mange større forsyninger ønsker at have en højere vandforsyningskapacitet end det aktuelle vandforbrug, for på den måde at have en sikkerhedsbuffer, og derved en større fleksibilitet til at imødekomme fremtidige problemstillinger. I dag er flere boringer lukningstruede på grund af øgede koncentrationer af nitrat, pesticider og andre miljøfremmede stoffer, og for at imødekomme dette, ønskes mulighed for at nedbringe indvindingen på særligt truede kildepladser. Idet det er dyrt, tidskrævende og udfordrende at oprette nye kildepladser, ønskes det undersøgt hvorvidt indvindingen på nuværende kildepladser kan øges, uden det har en negativ effekt på vandløb og våd natur. Nettonedbøren og dermed grundvandsdannelsen variere fra år til år, og det ønskes derfor undersøgt, om der er grundlag for at implementere indvindingstilladelser der varierer baseret på den årlige tilgængelige vandressessource.

Ved at variere indvindingen baseret på grundvandsdannelse, vil det ikke blot være muligt at øge indvindingen ved høj grundvandsdannelse, det vil også være muligt at minimere påvirkningen af den sårbare våde natur, ved at nedsætte indvindingen under tørre perioder.

2.1 Problemformulering

> *Hvordan vil en metode baseret på variable indvindingstilladelser, kunne bruges som et redskab, til at hjælpe større vandforsyninger med at opnå, deres målsætning om forbedret forsyningssikkerhed, og sikre en bedre udnyttelse af eksisterende kildepladser, samtidig med at påvirkningen af de sårbare vandløb og tilknyttede våde naturområder minimeres?*

Problemformuleringen leder til udfærdigelsen af følgende hypoteser:

1. *Det er muligt på baggrund af grundvandspotentiale at prædiktere vandføringen i vandløb flere måneder i forvejen.*
2. *Ved brug af en metode til at prædiktere vandføring i vandløb, kan der gives en tidsvarierende indvindingstilladelse.*
3. *Tidsvarierende indvindingstilladelser vil give mere fleksibilitet til vandforsyningen.*
4. *Dette koncept kan bruges til at opnå en større forsyningssikkerhed, samtidig med at våde naturområder kan beskyttes i kritiske perioder, og der kan indvindes mere vand i vintermånederne.*
5. *Tidsvarierende indvindingstilladelser kan benyttes til at minimere tilstedeværelsen af miljøfremmede stoffer i vores drikkevand.*

Disse hypoteser vil igennem udarbejdelsen af nærværende rapport blive be- eller afkræftet. Først beskrives det, hvordan hydrologien i grundvandsmagasiner fungerer, og dermed hvordan vandindvinding påvirker vandløb og våd natur, samt konsekvenser heraf. Dernæst vil det blive beskrevet hvilke parametre indvindingstilladelser i dag bliver udstedt på baggrund af, samt hvordan de muligvis vil blive udfærdiget i fremtiden. Det diskuteres lige nu hvorvidt den nuværende metode til bestemmelse af indvindingstilladelser, danner et realistisk grundlag for vurdering af vandløbspåvirkning, og en ny metode er derfor under udvikling. Det vurderes derfor, hvordan de to metoder hver især er i stand til at beskrive virkeligheden, ved brug i en prædiktionsmodel og derudfra vurderes hvilke fordele og ulemper hver metode er forbundet med.

Næste skridt er at finde ud af om der findes brugbare pejledata, der kan benyttes til udfærdigelsen af en prædiktionsmodel, samt for hvilke vandløb inden for Aalborg Kommune der findes brugbare vandføringsdata. Tilgængeligheden af vandførings- og pejledata danner grundlag for udvælgelsen af et case-område. Efterfølgende undersøges sammenhængen mellem pejledata og vandføringsdata.

For at det er muligt at anvende variable indvindingstilladelser, er det essentielt at responstiden, fra en indvinding justeres og til denne slår igennem på vandføringen i et vandløb, er forholdsvist kort. Dette vil blive undersøgt ved hjælp af en grundvandsmodel der omfatter case-området.

Når alle forundersøgelser er udfærdiget, vil potentialet ved implementering af prognose-baseret vandindvinding blive undersøgt via nogle beregningseksempler, der omfatter de analyserede vandløb og kildepladser.

Påvirkning af vandløb ved vandindvinding

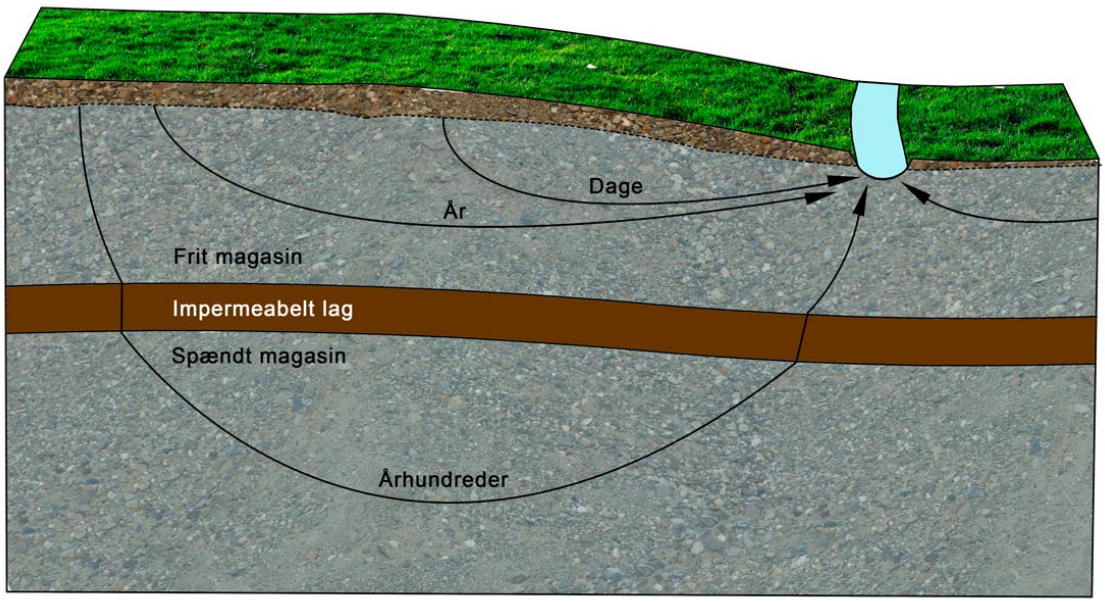
3

Nærværende kapitel indeholder teori omkring grundvandsmagasiner, vandløbspåvirkning ved vandindvinding, samt konsekvenser og konsekvensvurdering som følge heraf, i den forbindelse diskuteres ligeledes en ny metode til vurdering af vandløbspåvirkning.

3.1 Grundlæggende teori om grundvandssystemer

De følgende afsnit vil bidrage med en grundliggende indsigt ift. vandløbspåvirkning ved indvinding af grundvand. Dette afsnit er udfærdiget på baggrund af teori fra U.S. Geological Survey [2012].

Når regnvand infiltrerer fra jordoverfladen ned igennem den umættede zone, vil det til sidst ende i et grundvandsmagasin. Grundvandsmagasiner kan opdeles i to forskellige typer; frie- og spændte grundvandsmagasiner. Et frit grundvandsmagasin har et frit grundvandsspejl og tykkelsen af magasinet kan variere. Et spændt grundvandsmagasin, er et grundvandsmagasin hvor trykhøjden i magasinet er højere end magasinets tykkelse. Dette kan forekomme hvis grundvandsmagasinet er "spændt" imellem to impermeable jordlag (oftest ler). Idet et spændt magasin er under tryk, kan magasintykkelsen ikke variere. En illustration af disse to typer grundvandmagasiner er vist på figur 3.1.



Figur 3.1. Skitse af hvordan grundvand strømmer i de forskelle typer af grundvandsmagasiner. [U.S. Geological Survey, 2012]*

Grundvand i et grundvandsmagasin strømmer fra højt mod lavt tryk, og som vist på figur

3.1, er dette typisk fra områder med grundvandsdannelse, til områder med udstrømning til f.eks. vandløb eller indvindingsboringer. Grundvandsstrømningernes hastighed er afhængig af flere variable, heriblandt magasinets hydrauliske specifikationer, som jordens hydrauliske konduktivitet og den hydrauliske gradient i magasinet. Den hydrauliske konduktivitet, også kaldet den hydrauliske ledningsevne, er afhængig af jordtypen og indikerer modstanden for gennemstrømning.

Ift. et grundvandsmagasins evne til at afgive vand, er der forskel på om indvinding forekommer fra et frit grundvandsmagasin eller et spændt grundvandsmagasin. Magasinets evne til at afgive eller opmagasinere vand angives som magasintallet (en vigtig parameter ift. bestemmelse af påvirkning ved vandindvinding), denne er ved et frit grundvandsmagasin afhængig af både magasinets specifikke ydelse og specifikke magasintal, se formel 3.1. Den specifikke ydelse, er den mængde vand et grundvandsmagasin er i stand til at afgive ved dræning hvor grundvandspejlet ændres, og det specifikke magasintal angiver den mængde vand et grundvandsmagasin kan afgive ved at jorden trykkes sammen. Ved det spændte magasin kan grundvandsspejlet ikke ændres, og derfor er det kun jordens sammentryklighed (specifikke magasintal) der bidrager til magasintallet, se formel 3.2. Det betyder typisk at magasintallet er større ved et frit grundvandsmagasin end ved et spændt grundvandsmagasin. [Iversen et al., 2008]

$$S_{frit} = S_y + (S_s \cdot b) \tag{3.1}$$

$$S_{spndt} = S_s \cdot b \tag{3.2}$$

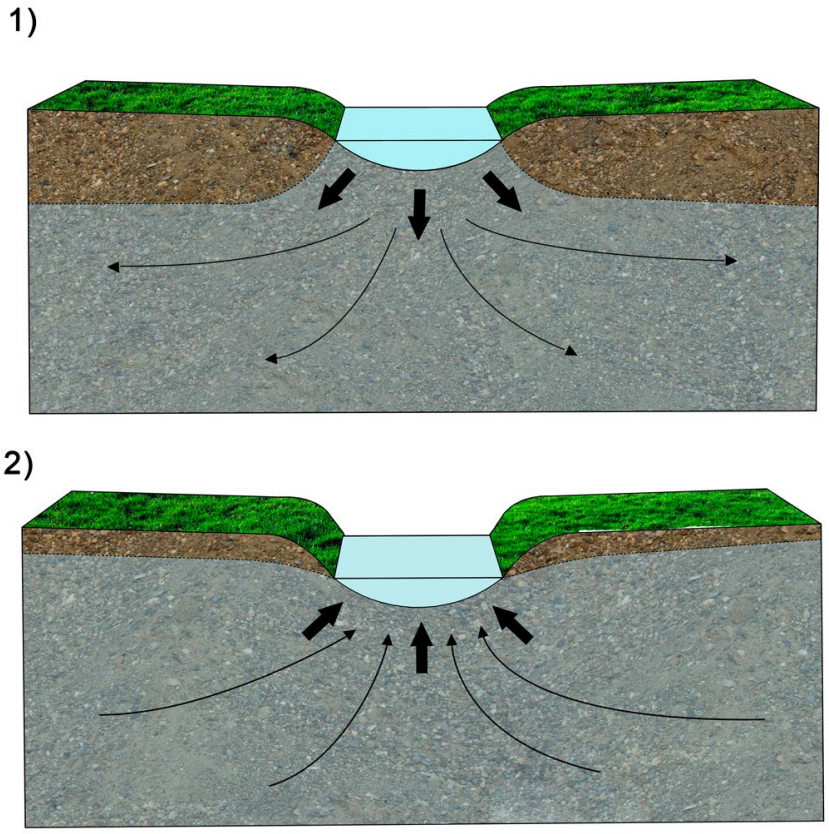
Hvor

S	Magasintal	[-]
S_y	Specifik ydelse	[-]
S_s	Soecifik magasintal	[1/m]
b	Magasintykkelse	[m]

Grundvandsmagasiner kan have forskellige karakteristikker, afhængig af geologi og hydrologiske parametre. Det er essentielt at have kendskab til et grundvandsmagasins karakteristik, for at kunne vurdere påvirkningen ved vandindvinding. Af forskellige magasintyper kan nævnes; et stabilt magasin, som er et magasin hvor grundvandsspejl, grundvandsdannelse og udstrømning er konstant. En anden type er et dynamisk magasin, hvor grundvandsdannelsen, udstrømningen og grundvandsstanden er varierende i tid. Dynamiske magasiner er de mest almindelige grundvandsmagasiner.

Grundvand bliver i Danmark både indvundet fra frie- og spændte grundvandsmagasiner. I begge tilfælde kan indvinding have en effekt på vandføringen i grundvandsfødte vandløb. Vandløb og floder er typisk de primære kilder hvor grundvand udstrømmer til, samtidig udgør grundvandsudstrømning ofte den største komponent af vandføringen i vandløb og floder. Vandløb modtager også vand fra andre kilder hvilke omfatter nedbør, overfladeafstrømning samt afstrømning i de øverste jordlag. Tilstrømningen fra det underliggende grundvandsmagasin udgør vandløbets baseflow. Størrelsen på baseflow komponenten angives som BFI-indeks, og angives med en værdi fra 0-1, hvor høje værdier angiver vandløb, hvor vandføringen i høj grad udgøres af baseflow. Grundvand udstrømmer

til vandløb igennem en vandmættet vandløbsbund, hvor grundvandsspejlet ligger højere end vandløbsoverfladen. Modsat kan vand fra vandløb også infiltrere til det underliggende grundvandsmagasin. Dette forekommer når grundvandsspejlet ligger lavere end vandløbets overflade se figur 3.2.



Figur 3.2. Vandløb kan afgive vand til det underliggende grundvandsmagasin, og kan ligeså vel modtage vand afhængigt af den relative højdeforskel mellem grundvandsspejl og vandspejlet i vandløbet. [U.S. Geological Survey, 2012]*

Vandets udvekslingshastighed, mellem et underliggende grundvandsmagasin og vandløbet, afhænger af den hydrauliske gradient imellem de to elementer, samt jordens hydrauliske konduktivitet. En leret/siltet vandløbsbund, med en meget lav hydraulisk permeabilitet, vil oftest reducere udvekslingen imellem vandløb og grundvandsmagasin. Et vandløb kan på nogle strækninger modtage vand fra det underligende magasin, og på andre strækninger kan vand infiltrere fra vandløbet til det underligende grundvandsmagasin. I takt med at grunvandsstanden i det underliggende magasin variere over tid (på grund af variationer i grundvandsdannelse, grundvandsindvinding samt andre variationer på hydrologiske faktorer), vil udvekslingen mellem vandløb og magasin også variere. Et vandløb kan altså i perioder modtage vand på en given strækning, og i andre perioder kan vand infiltrere fra vandløbet på den samme strækning.

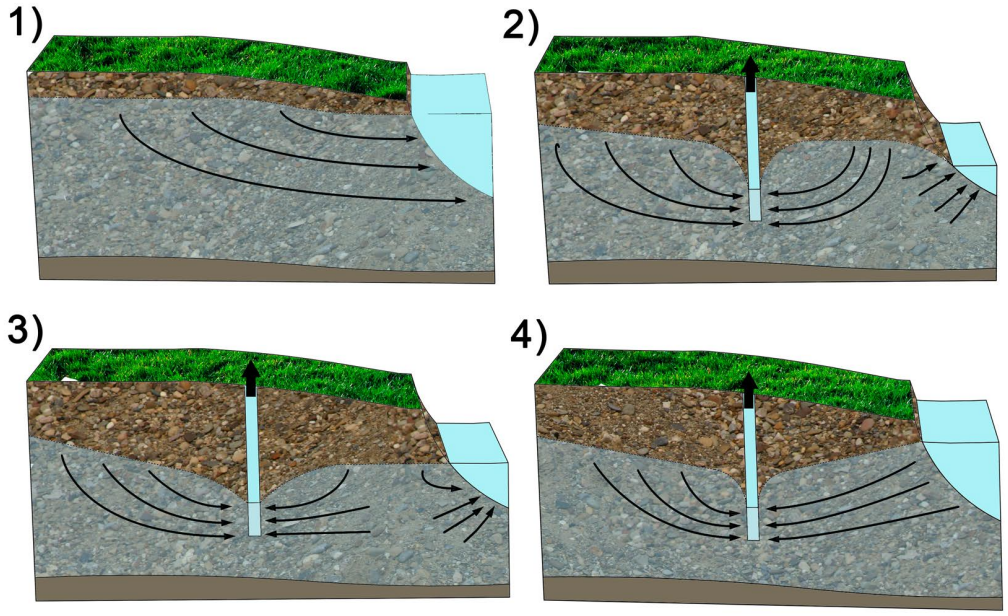
Det afvandingsområde der bidrager til vandføringen i et givet vandløb, defineres som vandløbets opland, og afgrænses af et vandskel. Der skelnes mellem topografisk og hydrologisk vandskel. Det topografiske opland afgrænses af det topografiske vandskel, og bidraget fra det topografiske opland til vandføringen i vandløb udgøres af overfladeafstrømning eller strømninger nær overfladen. Det hydrologiske opland er derimod det underjordiske opland, og afgrænses af grundvandsskel forårsaget af geologiske og hydrologiske forhold. Bidraget

fra det hydrologiske opland til vandføringen i vandløb er vandløbets baseflow. Det topografiske og det hydrologiske opland omfatter sjældent nøjagtigt det samme område. Ved vurdering af vandløbspåvirkning ved vandindvinding er det særligt vigtigt, at være bekendt med vandløbets hydrologiske opland, da en indvindingsboring placeret i dette vil påvirke udstrømningen til vandløbet.

Ikke alle vandløb er grundvandsfødte, nogle vandløb er udelukkende fødte af dræn og af afstrømmende regn- eller smeltevand. Et vandløb der ikke er grundvandsfødt, er ikke nødvendigvis hydraulisk forbundet med det underliggende grundvandsmagasin (Hvis der er en umættet zone mellem vandløb og grundvandsmagasin, er de ikke hydraulisk forbundne). Selvom vandløb og grundvandsmagasin ikke er hydraulisk forbundne kan der stadig infiltrere vand fra vandløbet til det underliggende grundvandsmagasin, men ved indvinding nær vandløbet vil vandføringen i vandløbet ikke blive påvirket.

3.2 Påvirkning af vandføring ved vandindvinding

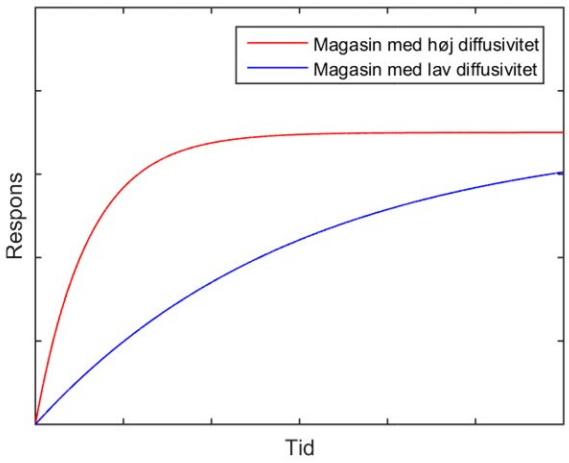
Når en indvindingsboring begynder at indvinde grundvand, vil grundvandsspejlet sænkes lokalt omkring boringen, og danne en sænkningstragt. Denne sænkning vil være størst nær indvindingsboringen, og blive mindre som afstanden til boringen stiger, se figur 3.3. Den hydrauliske gradient, der på grund af sænkningstragten dannes omkring boringen, vil tvinge grundvand til at strømme imod indvindingsboringen.



Figur 3.3. Effekt ved start af en indvinding i et grundvandsmagasin der udstrømmer til et vandløb. Pilene illustrerer vandets strømningsretning. 1: Under normale forhold er grundvandsdannelsen lig udstrømningen til vandløbet. 2: Kort efter indvindingen startes, vil alt hvad der indvindes blive taget direkte fra grundvandsmagasinetes opmagasinering. 3: Som sænkningstragtens radius øges, vil indvindingsboringen begynde at pumpe vand der ellers ville have strømmet til vandløbet. 4: Hvis der indvindes meget store mængder grundvand fra indvindingsboringen, vil vand der løber i vandløbet begynde at infiltrere fra vandløbet til grundvandsmagasinet. [U.S. Geological Survey, 2012]*

Idet en indvinding starter, vil alt vand der indvindes komme fra opmagasineringen i grundvandsmagasinet. Generelt udvides radius og dybden af sænkningstragten afhængigt af pumpetiden, indtil der opnåes en ligevægt. Frigivelsen af vand fra grundvandsmagasinets opmagasinering, vil i den første periode være det eneste sted, hvor der tages vand. Når sænkningstragtens radius når en vis udbredelse, kan den hydrauliske gradient, forårsaget af sænkningstragten, tvinge vand til boringen der ellers ville have strømmet til et vandløb, se figur 3.3 (eller hvis sænkningstragtens udbredelse og dybde når et punkt hvor våd natur påvirkes). Hvis en indvindingsboring indvinder over en lang periode, vil der til sidst ikke blive taget mere vand fra grundvandsmagasinets opmagasinering, men udelukkende vand der ellers ville have udstrømmet til vandløb, havet, våde natur områder mm. Den tid der går fra en indvinding startes, og til systemet når til en ligevægt, kan være få dage til flere år. Vandløbspåvirkning ved indvinding er ikke afhængig af størrelsen og retningen på strømningerne i grundvandsmagasinet.

De faktorer der påvirker en indvindings tidslige respons omfatter; geologiske forhold, dimensioner og hydrauliske forhold i grundvandsmagasinet, heriblandt placering af vandløb ift. placeringen af indvindingsboringen. Særligt to faktorer spiller en stor rolle ift. vandløbspåvirkning ved grundvandsindvinding: Afstanden fra indvindingsboringen til vandløbet, samt grundvandsmagasinets diffusivitet. Den hydrauliske diffusivitet angiver om en grundvandssænkning hovedsageligt vil forekomme vertikalt eller horisontalt (Ved en lav diffusivitet, vil sænkningstragten ved indvinding være høj og smal, ved en høj diffusivitet vil den være lav og bred). Den hydrauliske diffusivitet bestemmes ud fra transmissiviteten og magasintallet. Transmissiviteten er afhængig af den hydrauliske ledningsevne og magasintykkelsen. Responstiden ved en påvirkning af et system, vil være hurtigere ved en højere hydraulisk diffusivitet og modsat vil responstiden være langsommere ved en lavere hydraulisk diffusivitet, se figur 3.4



Figur 3.4. Respons ved henholdsvist lav og høj diffusivitet, og ved en konstant indvinding. [U.S. Geological Survey, 2012]*

Ved spændte magasiner er den hydrauliske diffusivitet oftest højere end ved frie magasiner, derfor vil sænkningstragtens radius øges hurtigere i spændte magasiner. En eventuel påvirkning fra en indvinding, vil derfor i de fleste tilfælde optræde tidligere, hvis der indvindes fra spændte magasiner ift. hvis der indvindes fra frie magasiner. Indvindes der fra frie magasiner, kan der gå mange år før en sænkningstragt når til en ligevægt, og den totale

effekt på våde naturområder og vandløb indtræffer. Afstanden fra en indvindingsboring og til det nærmeste vandløb, samt den hydrauliske diffusivitet indgår begge i et udtryk, der er meget brugt i vandløbspåvirknings problematikker, kaldet *Stream Depleation Factor (SDF)*, se formel 3.3.

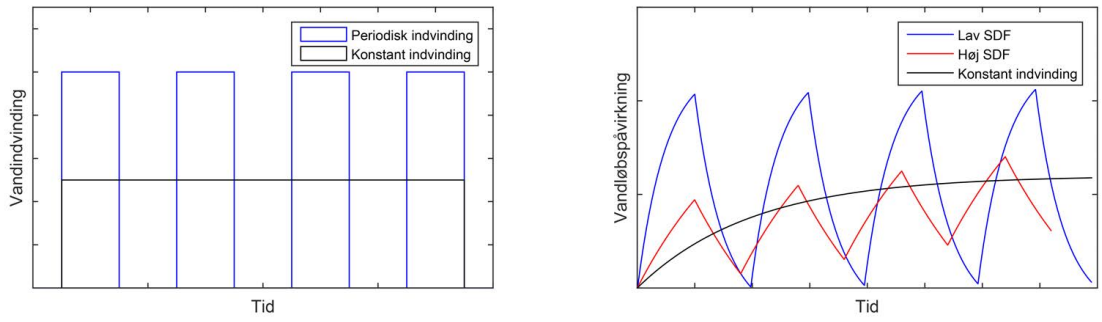
$$SDF = \frac{d^2}{D} \tag{3.3}$$

Hvor

d	Korteste afstand fra indvinding til vandløb	[m]
D	Hydraulisk diffusivitet	[m^2/t]

SDF er en relativ målestørrelse der angiver, hvor hurtigt en påvirkning fra en ny indvindingsboring vil påvirke nære vandløb. Hvis SDF tager en lav værdi vil responstiden være kort, og hvis SDF tager en høj værdi vil responstiden være lang. [U.S. Geological Survey, 2012]

I de fleste tilfælde forekommer grundvandsindvinding ikke med en konstant indvindingsrate, men snarere med en meget varierende indvinding der afhænger af efterspørgsel, vedligehold af indvindingsboringer, sæsonmæssige variationer mm. Ved varierende indvinding, kan en indvinding i visse perioder være meget kraftig og i visse perioder nærmest ikke tilstæde. Når en indvinding stopper, vil der ske det modsatte af når en indvinding starter. Sænkningstragten vil langsomt bliver jævnet ud af tilstrømmende grundvand, og grundvandsstrømninger vil gå tilbage til hvordan de var før indvinding. Ved varierende indvinding vil responstiden ift. vandløbspåvirkning have en dæmpende effekt på den totale vandløbspåvirkning, se figur 3.5. Således vil vandløbspåvirkningen have en størrelse der svarer til den gennemsnitlige indvinding(den sorte linje), dog afhængig af størrelsen af variationerne i indvindingen, samt hvor lang responstiden er (SDF).



Figur 3.5. Påvirkning af vandføring i vandløb ved varierende indvinding, og ved forskellig SDF værdi. Ved responsen for en konstant indvinding er SDF værdien den høje værdi (samme som den røde linje) [U.S. Geological Survey, 2012]*

3.3 Konsekvenser ved påvirkning af vandløb og vådområder

Dette afsnit indholder en diskussion af hvilke konsekvenser vandindvinding har på naturen, og hvilke metoder der bruges til at vurdere størrelsen af konsekvenserne. Der er flere forskellige metoder til vurdering af konsekvenser ved vandindvinding, nogle få er gennemgået i nærværende afsnit.

Den nuværende metode til bestemmelse af indvindingstilladelser stammer fra Miljøstyrelsen [1979], og er i mange interessenters opfattelse forældet. I det følgende gennemgås forskellige interessenters opfattelse af, hvorfor metoden er forældet. Århus Universitet har udarbejdet et forslag til en ny metode til bestemmelse af indvindingstilladelser, hvilken planlægges implementeret i vandplanernes 2. planperiode. Denne metode diskuteres sidst i afsnittet.

3.3.1 Vandplan 1: Vurdering af vandløbspåvirkning ved medianminimumsvandføring

Ved udstedelse af indvindingstilladelser, vurderes vandindvindingens påvirkning på et givet område. F.eks. påvirkning på vandløb og våde områder, iht. opfyldelse af miljømål, hvilket i dag udtrykkes ved krav til medianminimumvandføringen i vandløb. [Miljøministeriet, 2012] Den maksimalt tilladte påvirkning af medianminimumvandføringen ved vandindvinding, er bestemt på baggrund af miljømålsklassifikationen af vandløbet iht. vandplanerne, se tabel 3.1. (Førhen var den maksimale påvirkning bestemt af målsætningsklassifikationen (B1, B2, B3 osv.) og kunne variere mellem 5 - 50 % iht. Miljøstyrelsen [1979].)

Maksimal påvirkning af medianminimumvandføring		
Målsætning	Høj økologisk tilstand	God økologisk tilstand
Maksimal påvirkning	5 %	10-25 %

Tabel 3.1. Den maksimalt tilladte påvirkning af medianminimumsvandføringen i et vandløb på baggrund af miljømålsklassifikationen for det pågældende vandløb. Det overordnede miljømål indebærer at alle vandløb skal opnå god økologisk tilstand, hvorfor det også er den der er mest relevant. [Miljøministeriet Naturstyrelsen, 2011]

Grænseværdierne er baseret på *Miljøstyrelsens Vejledning i Recipientkvalitetsplanlægning fra 1979* Jensen et al. [2013], og har været objekt for en del kritik, da der er påvist en dårlig sammenhæng mellem medianminimumsvandføringen, og den økologiske kvalitet i vandløb. Der er ikke noget bevis for, hvorvidt medianminimumsvandføringen er brugbar til bestemmelse af levevilkår for makroinvertebrater, makrofytter og fisk i danske vandløb.[DMU, 2004] Derudover afhænger vandløbs økologiske tilstand, ikke kun af vandføringens størrelse, men også dens variation og varigheden af forskellige vandføringshændelser. [COWI, 2013] [DMU, 2004]

Hvis der indvindes grundvand i et opland, hvor der er et grundvandsfødt vandløb, risikeres baseflowet at blive reduceret. Ved regnhændelser vil den totale vandføring i vandløbet forøges, og dette vil give relativt kraftigere vandføringshændelser, altså en større procentvis forøgelse af flowet ift. Q50, og dette leder til et mere varierende hydrologisk regime.

Vandløb med et upåvirket hydrologisk regime er en sjældenhed, specielt blandt større vandløb. Samtidig forekommer vandløb med en naturlig lav sommervandføring, eller som er helt eller delvist udtørret i visse perioder af året. Hvilket kan besværliggøre udfærdigelsen af en specifik sammenhæng mellem medianminimumsvandføringen og den økologiske kvalitet, idet det er umuligt at vide hvilken økologisk kvalitet disse vandløb ville have opnået upåvirkede. Der findes ikke noget datagrundlag der kan dokumentere, hvor meget den økologiske tilstand påvirkes af vandindvinding. [DMU, 2004]

Der er ligeledes andre og mere essentielle faktorer der begrænser den opnåelige økologiske

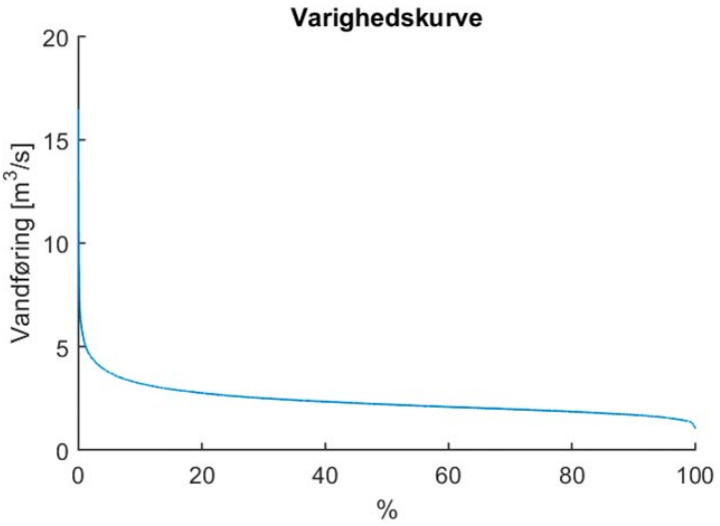
kvalitet i mange vandløb, herunder påvirkninger fra opstemninger samt andre fysiske forhold som kanalisering, grødeskæring, regulering mm. Dette medfører biologiske effekter, idet det begrænser omstændighederne for spredning af fisk og insekter, hvorfor dette kan være uforeneligt med høj økologisk kvalitet uafhængigt af vandindvinding. [DMU, 2004] [COWI, 2013]

Den generelle negative opfattelse omkring den nuværende metode til bestemmelse af indvindingstilladelser har medført at en ny metode er under udvikling til implementering i vandplanernes 2. planperiode.

3.3.2 Vandplan 2: Metode til vurdering af vandløbspåvirkning

Vandplan 2 metoden er udarbejdet af Århus Universitet, og er baseret på en mere grundig analyse af vandløbs varighedskurve, se figur 3.6. Den tager højde for DVPI (planter), DVFI (smådyr) og DFFVa (fisk), der er for disse beregnet gennemsnitlige økologiske kvalitetsratioer (EQR-værdier). Metoden er baseret på data fra 165 NOVANA-stationer i danske vandløb over en periode på ni år. Det er påvist i Grøber et al. [2014], at seks hydrologiske variabler er i stand til at give det bedste billede af et vandløbs økologiske status. For hvert af de tre kvalitetsratioer er der udarbejdet en model, med udgangspunkt i de seks forskellige vandløbsvariable, der giver den bedste sammenhæng mellem målte og beregnede data. [Grøber et al., 2014]

Herudover er slyngningsgraden medtaget som en parameter, der har til formål at repræsentere de fysiske faktorer i modellen, da disse er vigtige faktorer ift. den økologiske kvalitet i vandløb. De seks hydrologiske variable er $\frac{Q_{90}}{Q_{50}}$, Fre_1, Fre_{25}, Fre_{75}, Dur_3, samt BFI-Indekset. En nærmere gennemgang af de seks paramtetre vil forefindes i afsnit 8 omhandlende denne metode.



Figur 3.6. Eksempel på varighedskurve. Varighedskurven kan benyttes til at bestemme forskellige vandføringsfraktiler. De fleste af de parametre der anvendes i Vandplan 2 metoden kan bestemmes ud fra varighedskurven, f.eks. er Q50 den vandføring der findes ud for 50%.

For at kunne anvende denne metode til beregning af den økologiske kvalitet, kræves et datasæt med målinger over flere år. Dette er dog ikke tilgængeligt for langt de fleste (især mindre) vandløb, hvorfor det er nødvendigt at estimere varighedskurven

vha. andre metoder. F.eks. en hydrologisk model, hvor der modelleres både med og uden indvinding, eller ved hjælp af en oplandsanalyse, hvor vandløbet sammenlignes med et vandløb med kendte vandføringer i samme opland. Ved brug af sidstnævnte metode estimeres vandføringen ud fra en direkte sammenligning relativt ift. oplandets størrelse. Det anbefales iht. GEUS [2014], at DK modellen anvendes til modellering af varighedskurver med og uden indvinding. Parametrene der indgår i vandplan 2 metoden beregnes herefter med udgangspunkt i disse varighedskurver. For vandløb og våde områder hvor et mindre og mere præcist opland er en nødvendighed, anbefales det iht. GEUS [2014], at der udføres submodeller.

Når varighedskurver med og uden indvinding er udfærdiget, vurderes sandsynligheden for om vandindvinding udgør en risiko for den økologiske tilstand i vandløbet. Der er endnu ikke udarbejdet konkrete planer for implementeringen af denne metode, da der er en del usikkerheder forbundet med dennes implementering. [Grøber et al., 2014] Det gælder f.eks. usikkerheder på den geologiske model, afhængigt af hvor kompliceret geologien er i det implicerede opland, sammenholdt med oplandets størrelse. Samtidig er der visse usikkerheder forbundet med anvendelsen af DK modellen, idet ID 15 oplandene med en størrelse på ca. 15 km^2 medfører en stor usikkerhed ved beregning af påvirkningen på mindre vandløb og våde områder. Disse områder er i mange tilfælde de mest udsatte. Modellen vil overordnet set ikke være i stand til at belyse, hvad der sker inden for et enkelt opland. Samtidig vil små geologiske variationer, der kan give anledning til lokale strømningsforhold, ikke være mulige at belyse. Det vil altså kort sagt være forbundet med besvær, og en del usikkerheder at kortlægge en enkelt borings påvirkning på et mindre, lokalt vandløb. Det er samtidig til diskussion om forklaringsgraderne for de udførte modeller, (forklaret korrelation mellem målte EQR værdier og modellerede EQR værdier) er tilstrækkelige til at udgøre grundlaget for bestemmelse af indvindingstilladelser for vandplanernes 2. planperiode. Forklaringsgraderne er dog betydeligt bedre ift. medianminimumvandføring, se tabel 3.2. [GEUS, 2014]

Ny metode	
Model	Forklaringsgrad (R^2)
Makrofytter	0,34
Makroinvertebrater	0,44
Fisk	0,49
Medianminimumsvandføring	
Model	Forklaringsgrad (R^2)
Makrofytter	0,12
Makroinvertebrater	0,15
Fisk	0,16

Tabel 3.2. Forklaringsgrader for målte EQR værdier og modellerede EQR værdier for den nye metode. Forklaringsgraderne for medianminimumsvandføring er udført vha lineære modeller af typen EQR = a + b $\cdot$ Q_{mm} hvor a og b er fitted til hver af de tre kvalitetselementer. [Grøber et al., 2014]

3.3.3 Habitatkonsekvensvurdering

Ved særligt følsom natur (Natura-2000 områder), kan det være utilstrækkeligt at vurdere påvirkning vha. simple metoder, og det er derfor nødvendigt at udføre en habitatvurdering. Ved en habitatvurdering vil en vurdering af påvirkningen af specifikke arter, og særlige naturtyper indgå. En kildeplads kan dermed først etableres når det er bevist igennem en

grundig habitatkonsekvensvurdering, at denne ikke vil påvirke flora og fauna negativt.

3.4 Mulighed for at implementere variable indvindingstilladelser

For at være i stand til at implementere variable indvindingstilladelser, er det essentielt at kunne prædiktere en kritisk tilstand i et givet vandløb, før tilstanden indtræffer. Dermed vil de følgende kapitler beskrive udfærdigelsesprocessen af en prædiktionsmodel. Umiddelbart vil en prædiktionsmodel baseret på medianminimumsvandføringen være den mest enkle at udføre, idet kun én parameter skal prædikteres. Det vurderes umiddelbart, at en prædiktionsmodel baseret på vandplan 2 metoden vil blive mere indviklet, idet flere parametre skal fremskrives, og dermed medføre større usikkerheder. Det vil i nærværende rapport blive diskuteret, om der er potentiale for implementering af variable indvindingstilladelser baseret på medianminimumsvandføringen og vandplan 2 metoden.

Det følgende kapitel vil omhandle en analyse af vandførings- og pejletidsdata, til fremskrivning af vandløbskarakteristik.

Del I

Analyse

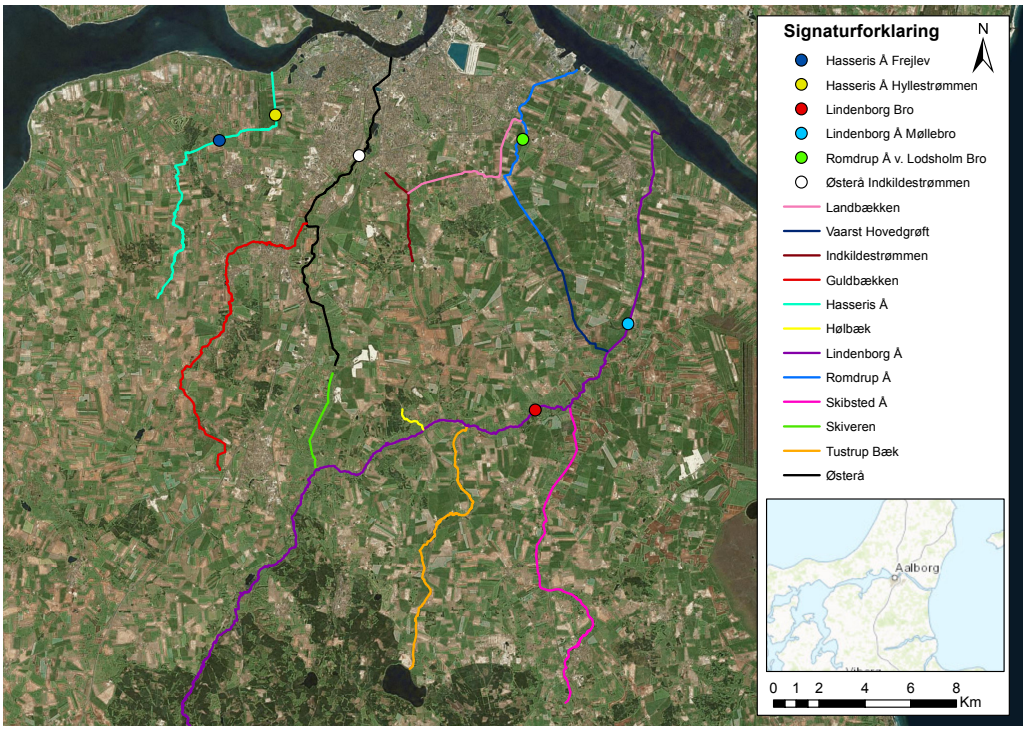
I denne del undersøges det, om det er muligt at prædiktere årsminimumsvandføringer på baggrund af pejledata. Først analyseres vandløbskarakteristikker for vandløb beliggende i den sydlige del af Aalborg Kommune, og herefter udvælges de relevante pejleserier. Der udarbejdes en korrelationsanalyse mellem pejledata og årsminimumsvandføring, i denne forbindelse undersøges det hvordan forskellige faktorer påvirker forklaringsgraden. Slutteligt, med udgangspunkt i den udfærdigede analyse, opstilles en prædiktionsmodel til prædiktion af årsminimumsvandføringer.

Analyse af vandførings- og pejledata 4

I nærværende kapitel screenes datagrundlaget for grundvandspotentiale og vandføring i vandløb inden for Aalborg Kommune. Disse data skal senere benyttes til en korrelationsanalyse, der skal belyse forklaringsgraden imellem grundvandspotentiale og årsminimumsvandføring i vandløb. For at undersøge potentialet for implementering af variable indvindingstilladelser, udvælges vandløb med de mest komplette vandføringsdatasæt. Pejledata beskriver variationen af grundvandspotentialet. Ved udvælgelsen af relevante pejleboringer til en senere analyse, ligges der især vægt på et grundigt datagrundlag, og en høj korrelation til årsminimumsvandføringen i vandløb.

4.1 Udvælgelse af vandføringsdata

Fra Miljøportalen [2015] findes vandføringsdata fra seks forskellige vandføringsstationer inden for Aalborg Kommune, de seks målestationer er placeret som vist på figur 4.1.



Figur 4.1. Kort over de største vandløb indenfor Aalborg Kommune samt flow målestationer hvorfra data er tilgængelig.

Vandføringsdata fra de seks vandløb omfatter døgnmiddel vandføringer baseret på beregnede Q-h relationer for varierende perioder. Vandføringsdata til enkelte vandløb er meget begrænset, idet tidshorisonten enten er meget kort, eller der er større datahuller.

Data omfanget af de seks vandløb kan ses i tabel 4.1.

	St. Nummer	Periode	Målinger
Hasseris Å Frejlev	10000016	01/01/1991 - 31/12/2014	7379
Hasseris Å Hyllestrømmen	10000017	01/01/2012 - 31/12/2014	1097
Lindenborg Bro	14000022	01/01/1970 - 31/12/2014	16436
Lindenborg Å Møllebro	14000016	01/01/1989 - 31/12/2014	9496
Romdrup Å v. Lodsholm Bro	10000011	01/01/1970 - 31/12/2014	15043
Østerå Indkildestrømmen	10000010	01/01/2007 - 31/12/2014	1464

Tabel 4.1. De seks flowserier fra Miljøportalen [2015].

Kvantiteten af vandføringsdata fra de seks målestationer, er for enkelte vandløb ikke høj nok til at kunne benyttes til en korrelationsanalyse. Ved overfladisk inspektion af tilgængelig data, kan tidsserien fra Hasseris Å Hyllestrømmen sorteres fra, da tidsserien er for kort til at kunne påvise en sammenhæng. Det samme er tilfældet med tidsserien fra Østerå Indkildestrømmen, hvor der reelt kun er data fra nogle få år på grund af store datahuller. Tilbage er der fire tidsserier, der alle spænder over en lang periode og er uden væsentlige datahuller. Sammenhængen mellem pejledata og årsminimumsvandføringer, for vandføringsdata tilgængelige for Hasseris Å Frejlev, er i forvejen analyseret i et tidligere speciale Jellesen [2015], hvorfor det vurderes mere interessant, at fokusere på de øvrige vandløb. Endeligt er der tre vandløb tilbage, hvis afstrømningskarakteristik vil blive analyseret yderligere.

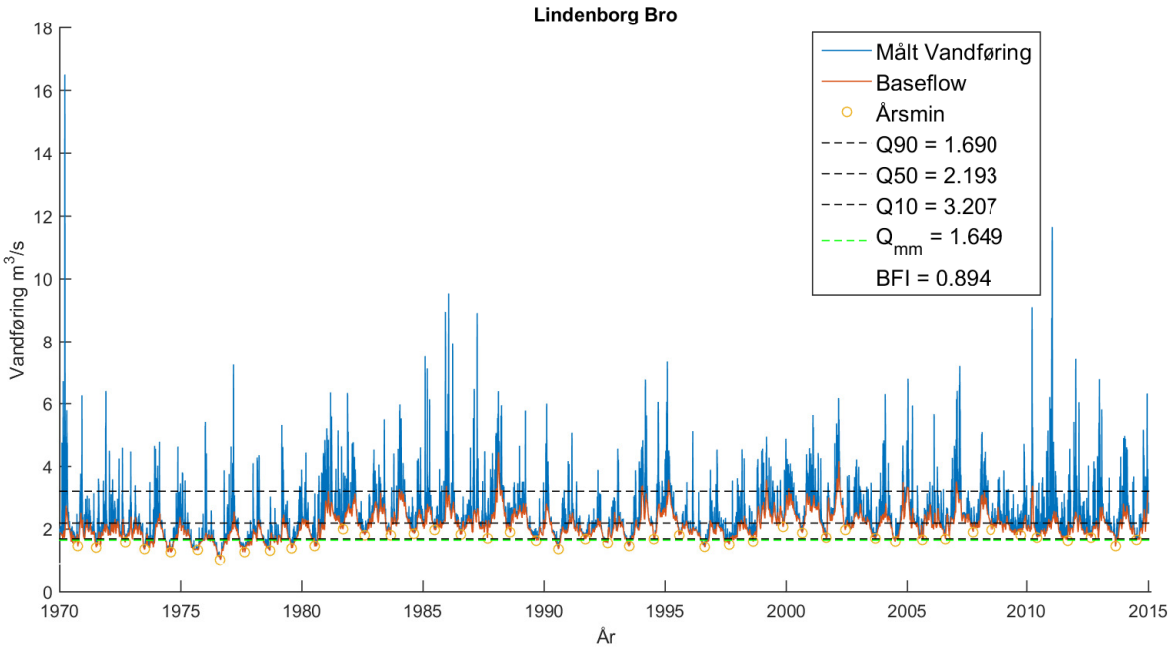
4.1.1 Analyse af vandføring i vandløb

I dette afsnit vil nøgleparametre til vandføringskarakterisering blive gennemgået. Der tages udgangspunkt i vandføringstidsserierne fra Lindenborg Bro og Romdrup Å her i hovedrapporten, en tilsvarende analyse er lavet for Lindenborg Å Møllebro, og kan findes i appendiks B. For at bestemme sammenhængen mellem grundvandspotentiale og vandføringsdata, er det essentielt at kende vandløbets baseflow. Der er i den forbindelse foretages en databehandling hvor baseflow separeres. Denne proces kaldes baseflow seperation og kan udføres på flere måder.

To forskellige metoder testes på vandføringstidsserien fra Lindenborg Bro, for at identificere eventuelle forskelle baseret på metodevalg. Matlab scripts med udførelsen af baseflow separationen findes på bilags cd'en i mappe A.1. Den første metode kaldet "The Digital Filter Technique"[Nathan og McMahon, 1990] er baseret på en udregning af overfladeafstrømningen ved hjælp af en filter koefficient, samt den samlede afstrømning. Metoden er en hurtig og nem metode til udførelse af baseflow separering. Denne metode samt resultatet er yderligere beskrevet i bilag B. I vandplan 2 metoden til bestemmelse af indvindingstilladelser benyttes en metode til baseflow separering beskrevet i Gustard et al. [1992]. Fremgangsmåden til baseflow separering vha. Gustard et al. [1992] udføres i fire beregningstrin:

1. Døgnmiddel data serien opdeles i blokke af fem datapunkter der ikke overlapper. Minimumsvandføringen beregnes for hver blok. Dette leder til Q_1, Q_2, Q_3,.. Q_n værdier, datoen for hver udregnede minimumsværdi er kendt.
2. Værdierne (Q_1, Q_2, Q_3), (Q_2, Q_3, Q_4) osv. betragtes i hvert tilfælde. Hvis den centrale $Q_i \cdot 0.9 <$ de ydre værdier er denne værdi repræsentabel for baseflowet. Er det modsatte tilfældet forkastes Q_i. Dette leder til QB_i værdier der alle vil have forskellige tids perioder imellem dem, og som alle er repræsentable for baseflowet.
3. Vha. linear interpolation imellem QB_n værdier genereres en baseflow-værdi for hver dag.
4. En sidste sortering udføres. Hvis $QB_i > Q_i$ overskrives $QB_i = Q_i$.

Resultatet af baseflow separeringen baseret på Gustard et al. [1992] ses på figur 4.2 for Lindenborg Bro.

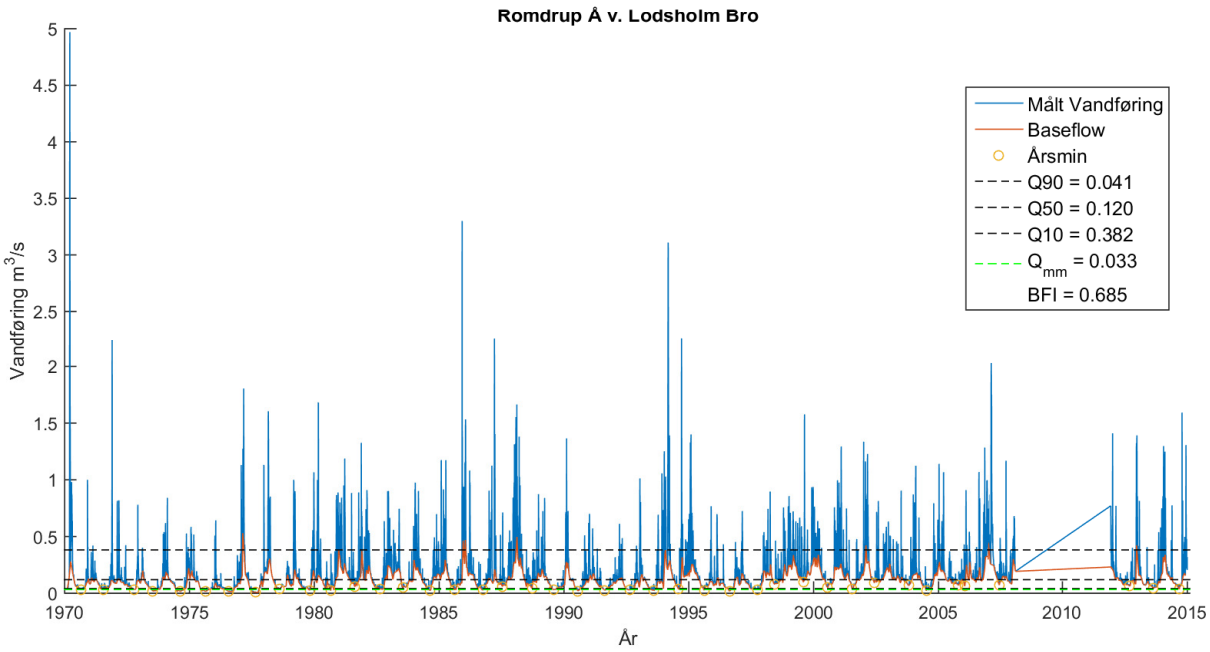


Figur 4.2. Flowserie samt hydrologiske parametre for målestationen ved Lindenborg Bro. Baseflow og BFI er beregnet vha. Gustard et al. [1992]

Det observeres at især BFI indekset bliver betydeligt lavere ved anvendelse af Gustard et al. [1992] ift. Nathan og McMahon [1990], hvorfor det altså ikke er ligegyldigt ift. BFI hvilken metode der er anvendt til baseflow separeringen. Det observeres også at baseflow separeringen generelt giver en mere jævn kurve ved anvendelse af Gustard et al. [1992], idet flere fluktuationer frafiltreres. I nærværende rapport vil resultater beregnet med Gustard et al. [1992] derfor benyttes, i og med denne også er anvendt i udarbejdelsen af vandplan 2 metoden.

Medianminimumsvandføringen i Lindenborg Å er beregnet til 1,649 m^3/s. Ved at sammenligne medianminimumsvandføringen med Q50 vurderes det, at de lave vandføringer relativt til middelvandføringen i vandløbet ikke varierer meget. Disse vandføringsvariationer indikerer et meget stabilt vandløb. Fra baseflow separeringen udført vha. Gustard

et al. [1992] fås et baseflowindeks (BFI) på 0,894 hvilket indikerer at Lindenborg Å i høj grad er grundvandsfødt. Det er tydeligt at den største del af vandføringen i Lindenborg Å består af baseflow. Idet dette er tilfældet bør Lindenborg Å være optimal ift. at bestemme korrelationer mellem vandføring og grundvandspotentiale. Resultatet for Romdrup Å ses på figur 4.3.



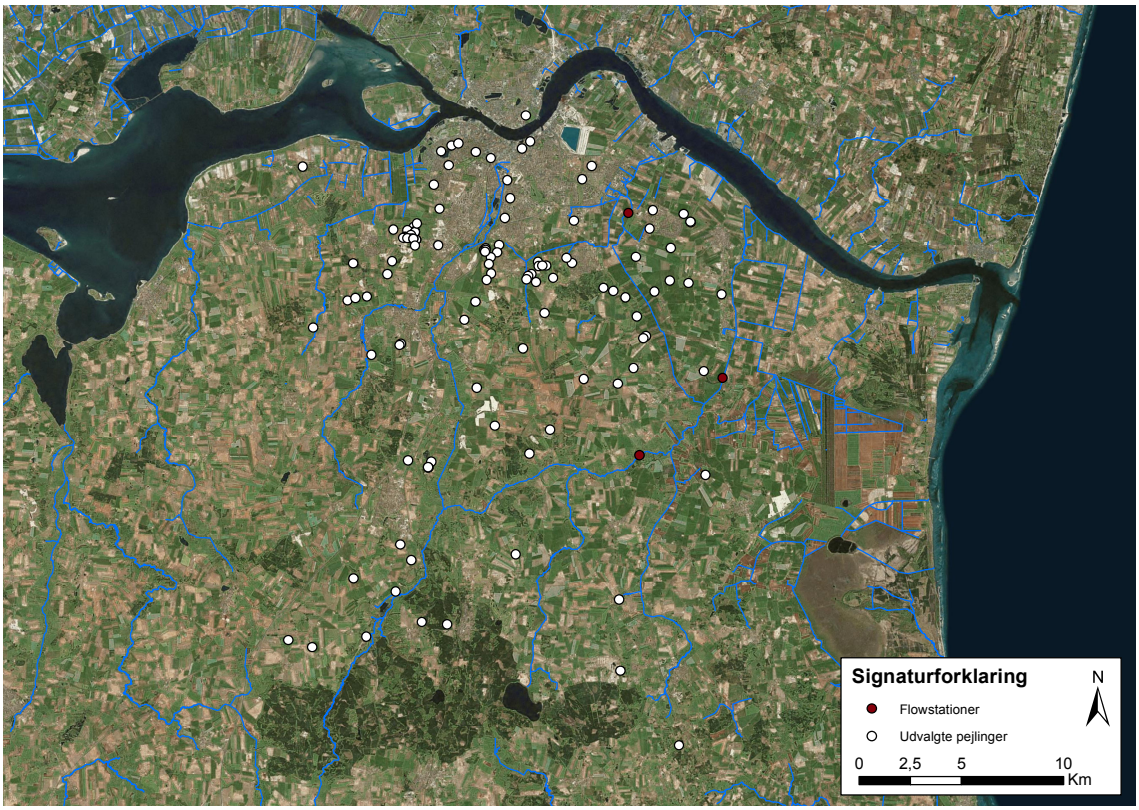
Figur 4.3. Flowserie samt hydrologiske parametre for målestationen ved Romdrup Å. Baseflow og BFI er beregnet vha. Gustard et al. [1992]

Vandføringen i Romdrup Å varierer generelt mere end vandføringen i Lindenborg Å. Der er en faktor 3 i forskel på medianminimum og Q50, hvilket indikerer et vandløb med meget varierende vandføringer. Dette kan skyldes at vandløbet i høj grad udgøres af afstrømmende regnvand, hvilket bekræftes af et lavere BFI indeks.

4.2 Udvælgelse af pejledata

Det vurderes at det er nødvendigt at indhente pejledata fra både Aalborg- og Rebild Kommune, da Lindenborg Å har udspring i Rebild Kommune. Alle pejledata hentes fra GEUS [2015]. Sorteringen af pejledata er efterfølgende udført i et Matlab script, og dette kan findes i appendiks A.2.

Før pejleserierne analyseres foretages der en grovsortering, hvor pejleserier der ikke dækker over en ti årig periode sorteres fra. Det vurderes at der kræves pejledata fra en periode på mindst ti år, for at opnå brugbare resultater i en korrelationsanalyse, og for at undgå statistiske usikkerheder. Det er ligeledes nødvendigt at pejleserierne indeholder flere målinger om året, for at få et realistisk billede af årsvariationerne - derfor sorteres dataserier med under 40 målinger ligeledes fra. Efter denne sortering er foretaget er der 116 pejleserier tilbage, disse er illustreret på figur 4.4.



Figur 4.4. Placeringen af de 116 boringer.

I det følgende kapitel udarbejdes en korrelationsanalyse, hvor vandføringsdata fra Lindenborg Å og Romdrup Å korreleres med pejledata.

4.3 Opsamling

- Der er valgt to vandløb til den videre analyse, Lindenborg Å og Romdrup Å. Der er to målestationer på Lindenborg Å, og dermed to datasæt.
- To forskellige metoder til baseflow separering er benyttet, og det er konkluderet at der forefindes en usikkerhed ved metodevalg. Derfor benyttes den samme metode til baseflowseparering som også anvendes til vandplan 2 metoden, se afsnit 3.3.2.
- Det vurderes at der findes 116 pejleserier inden for det sydlige Aalborg- og nordlige Rebild Kommune, med tilstrækkelig datakvalitet.

Korrelationsanalyse

5

Denne analyse vil belyse om det er muligt at fremskrive årsminimumsvandføringen i vandløb, hvis pejledata nogle måneder før er kendt. For at gøre det muligt, at udstede tidsvarierende indvindingstilladelser, er det nødvendigt at kunne prædiktere årsminimumsvandføringshændelser. Korrelationsanalysen foretages på baggrund af historiske data, som tidligere er beskrevet i kapitel 4. Hvor Lindenborg Å og Romdrup Å er udvalgt på baggrund af det tilgængelige datagrundlag. Samtlige analyser er foretaget i Matlab scripts og kan findes i appendiks A.2.

Der er udført en analyse der viser at en korrelation af det samlede pejle- og flow datasæt, hvor de tidslige variationer i grundvandspotentialet korreleres med variationer i vandføringerne, denne analyse har ikke bidraget med brugbare resultater for det pågældende opland. For yderligere forlaring, se appendiks C.

I nærværende kapitel fokuseres der på korrelationen af årsminimumsvandføringen med pejledata fra månederne op til og umiddelbart efter årsminimumsvandføringen optræder.

5.1 Korrelation af årsminimumsvandføring med pejledata

I analysen af vandføringsdata, se afsnit 4.1, udtrækkes årsminimumsvandføringen for hvert år, i perioden 1972-2014 for Lindenborg Å og for 1970-2014 for Romdrup Å. Ud fra afsnit 4.2 er der udvalgt 116 pejleserier.

Ved pejleserier hvor der er mere end gennemsnitligt fire pejlinger om året, er pejlingerne interpoleret så der fås en interpoleret pejling hver dag. Det vurderes at fire pejlinger om året er tilstrækkeligt til at give et billede af grundvandspotentialets årsvariation. Ved de pejleserier hvor der er færre end gennemsnitligt fire pejlinger om året, er der kun udført en korrelation i de måneder hvor pejlingerne er foretaget. For yderligere information om hvordan sorteringen er udført, se appendiks A.2.

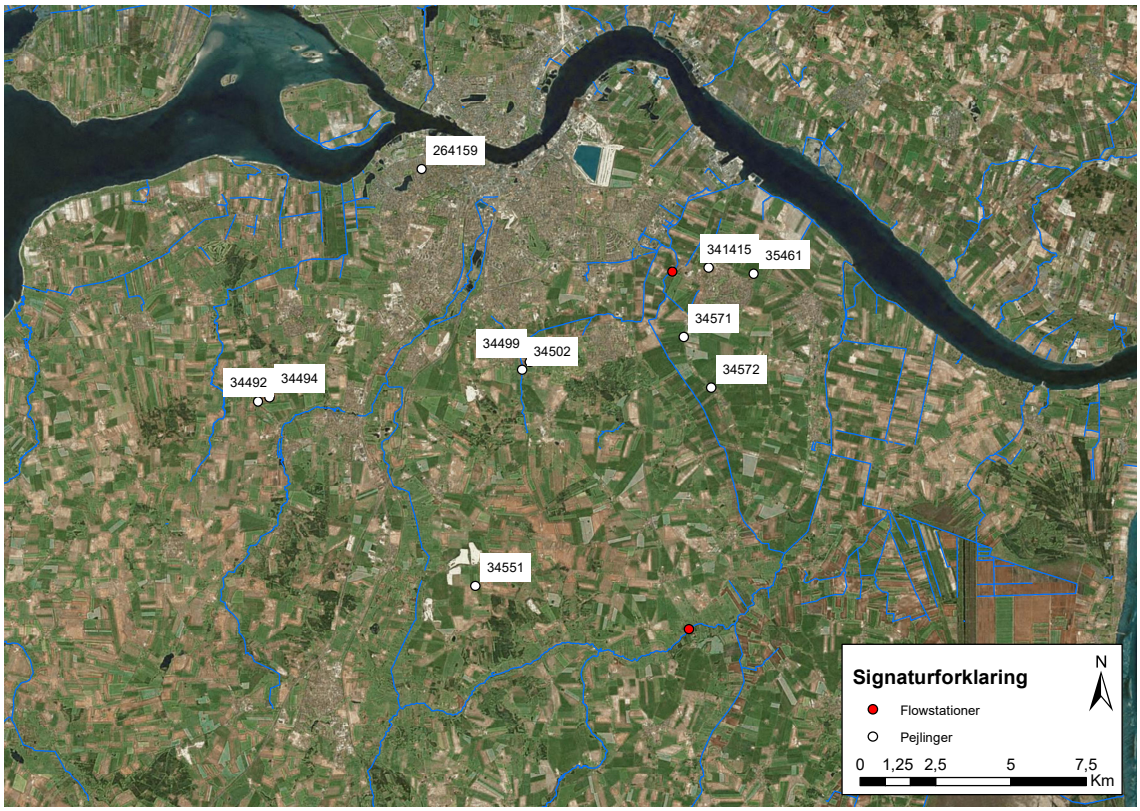
De tilbageværende pejleserier korreleres med årsminimumsvandføringen for Lindenborg Å og Romdrup Å. Fra de interpolerede pejleserier beregnes en middelpejling for hver måned, og herudfra beregnes en korrelationskoefficient mellem middelpejling og årsminimumvandføringerne. Derved kan det konkluderes om der er en sammenhæng mellem grundvandspotentiale og målt årsminimumvandføring, og om det er muligt at prædiktere fremtidig årsminimumvandføring ud fra pejledata.

Der arbejdes kun videre med de korrelationer som er underbygget af en dataserie (et overlab mellem vandførings- og pejledata) på minimum 10 år. Der er to flowstationer i Lindenborg Å, én ved Lindenborg Å Møllebro som omfatter perioden 1989-2014, og én ved Lindenborg Bro som omfatter perioden 1972-2014, som beskrevet i tabel 4.1. Dette betyder

at der for vandføringstidsserien fra Lindenborg Å Møllebro, ikke er nogen pejleserier der er brugbare. Derfor arbejdes der videre med flowstationen ved Lindenborg Bro. Fremover vil denne blot benævnes Lindenborg Å.

Der bestemmes en korrelation for hver måned mellem årsminimumsvandføringen og middelpejlingen. Da årsminimumsvandføringen oftest forekommer om sommeren, er pejlingerne fra oktober til december måned korreleret med årsminimumsvandføringer fra året efter. Hvor pejlinger i januar til september måned er korreleret med årsminimumsvandføringer samme år.

Efter korrelationerne er udført sorteres pejledataene igen, denne gang på baggrund af den maksimale styrke af korrelationen. Dermed sorteres alle pejleserier med en maksimal korrelation under 0,5 fra. 8 pejleserier er repræsenteret både for Lindenbog Å og Romdrup Å, og da det ønskes at arbejde videre med 10 pejleserier, vælges herudover de pejleserier der giver den stærkeste korrelation for hvert vandløb. Placeringen af disse pejleboringer er vist på figur 5.1.



Figur 5.1. Placeringen af de 10 udvalgte pejlinger.

Lindenborg Å

For at vurdere forklaringsgraden af de forskellige pejleserier, gennemgås resultaterne fra korrelationsanalysen i det følgende. Tabel 5.1 viser de maksimale korrelationer for Lindenborg Å, samt i hvilken måned de forekommer, ydermere er antal pejlinger og tidshorisonten som korrelationen er beregnet ud fra, listet op.

DGU nr.	R^2_{max}	Måned	Pejlinger	Start	Slut	År i alt
26.4159	0,25	jun	99	1985	1995	11
34.492	0,85	jul	243	1972	1995	24
34.494	0,84	apr	133	1972	1983	12
34.499	0,78	mar	111	1972	1982	11
34.502	0,76	jul	238	1972	1995	24
34.551	0,71	sep	26	1972	1984	13
34.571	0,57	dec	226	1972	1995	24
34.572	0,57	nov	184	1972	1995	24
34.1415	0,71	jul	79	1987	1995	9
35.461	0,65	jun	150	1987	1995	9

Tabel 5.1. Korrelationerne for de 10 bedste pejleserier i Lindenborg Å.

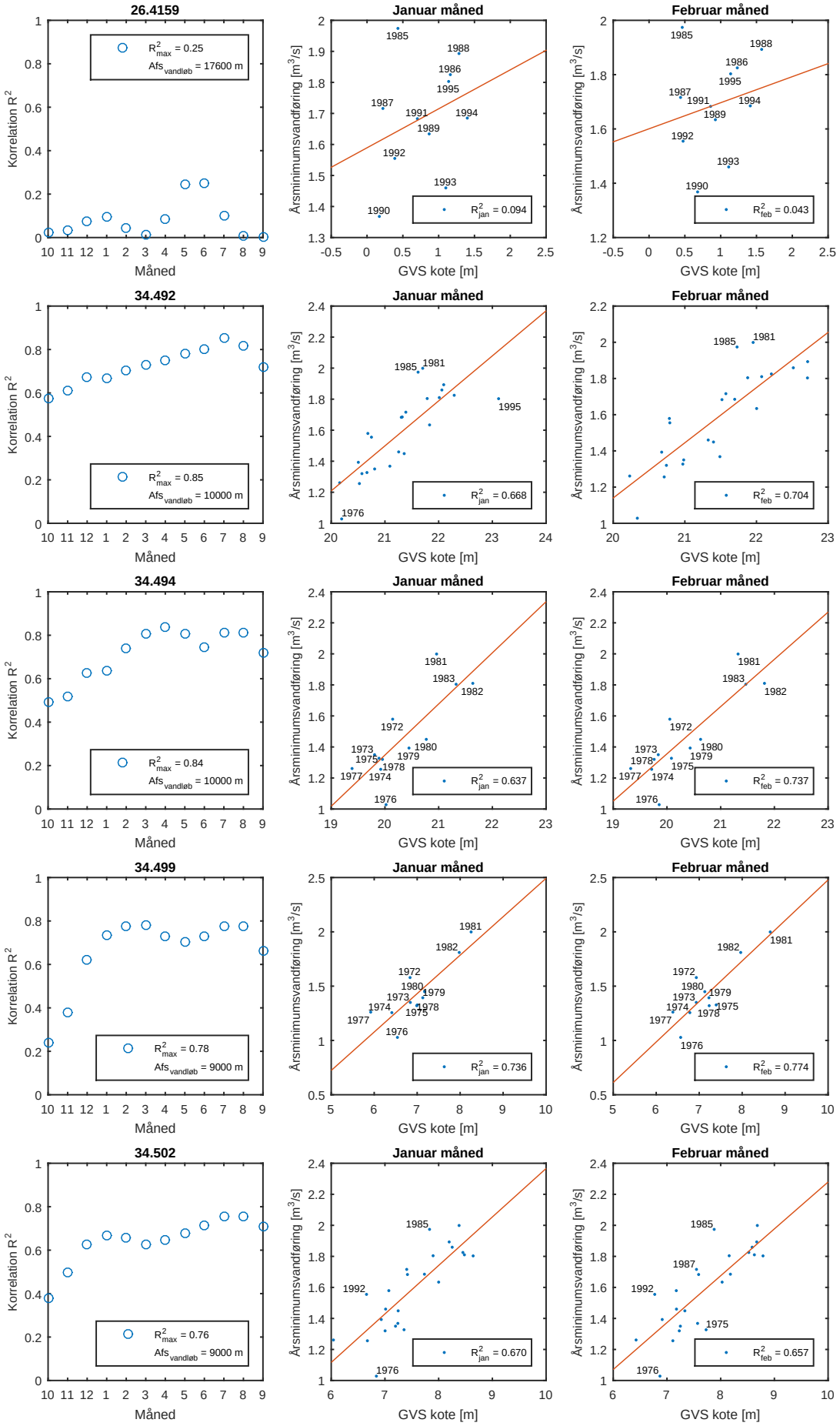
Romdrup Å

I tabel 5.2 er de samme 10 pejlinger som for Lindenborg Å listet. Den maksimale korrelation er beregnet og det er angivet hvilken måned den forekommer i.

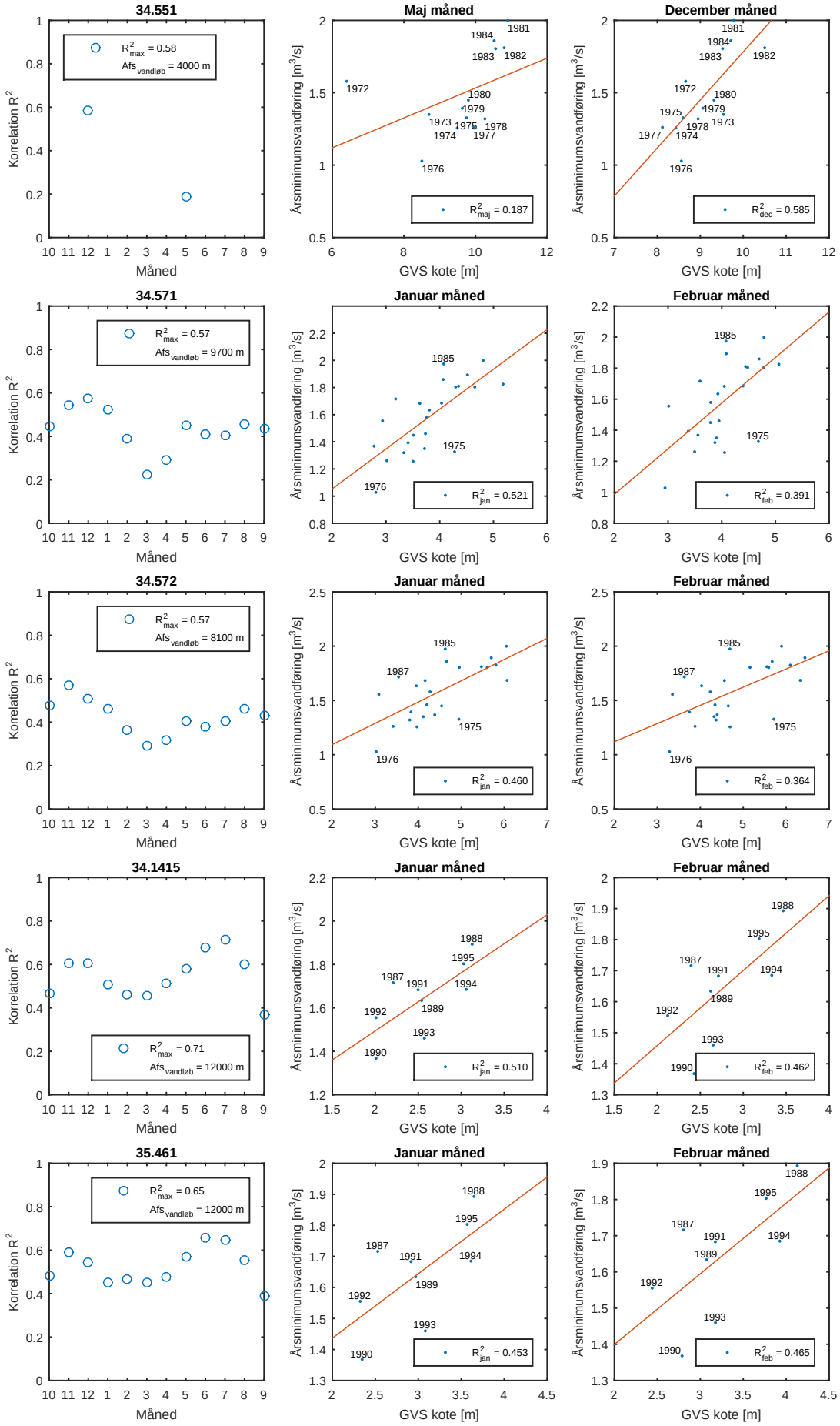
DGU nr.	R^2_{max}	Måned	Pejlinger	Start	Slut	År i alt
26.4159	0,64	jul	99	1985	1995	11
34.492	0,44	jul	265	1970	1995	26
34.494	0,67	jul	156	1970	1983	14
34.499	0,71	apr	134	1970	1982	13
34.502	0,39	aug	261	1970	1995	26
34.551	0,59	sep	28	1971	1984	14
34.571	0,52	sep	249	1970	1995	26
34.572	0,51	sep	207	1970	1995	26
34.1415	0,60	aug	79	1987	1995	9
35.461	0,62	aug	150	1987	1995	9

Tabel 5.2. Korrelationerne for de 10 bedste pejleserier i Romdrup Å.

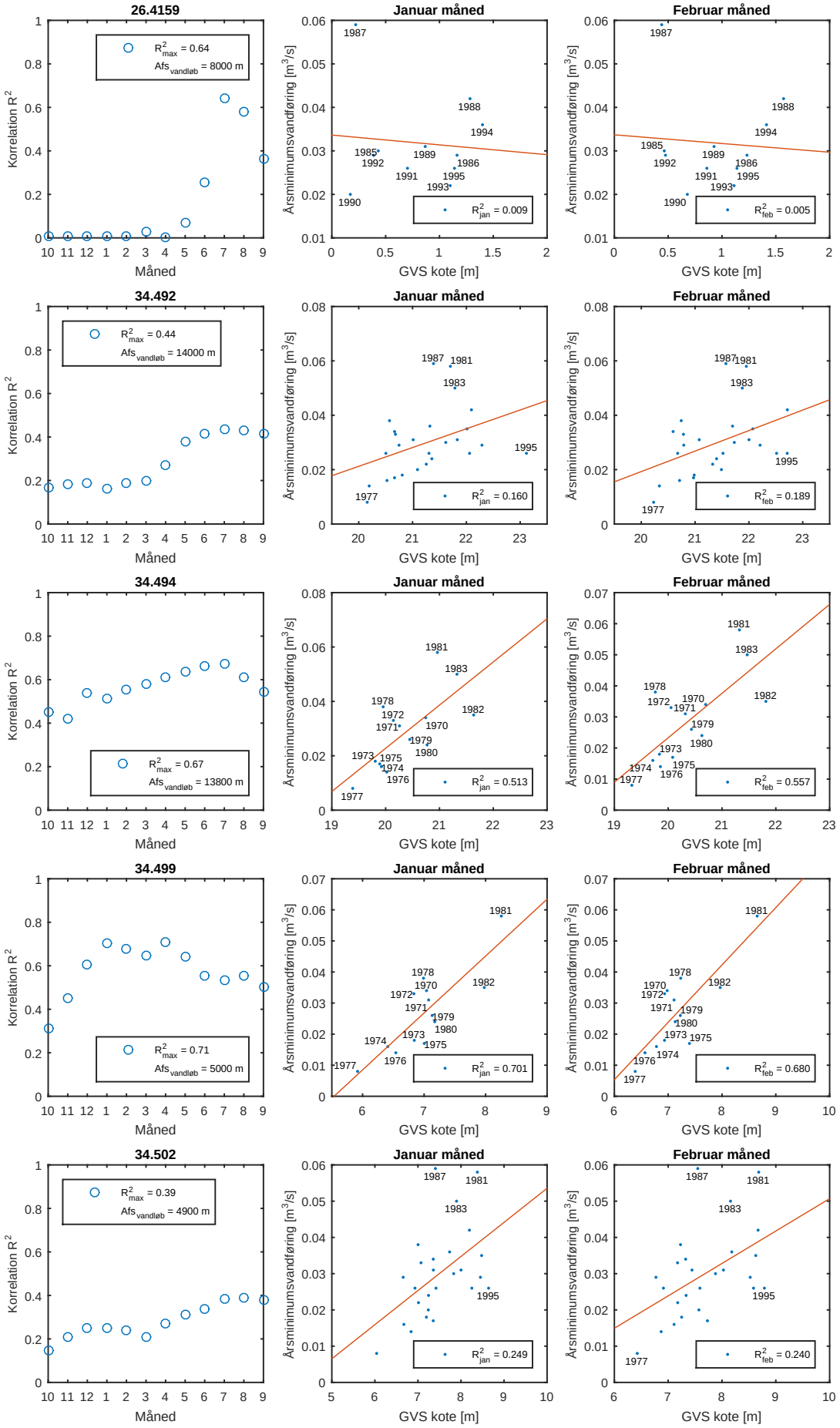
I det følgende ses der på alle korrelationerne for de udvalgte pejleserier. Det observeres at sammenhængen mellem årsminimumsvandføring og middelpejlinger er nogenlunde lineær, derfor benyttes Peerson's korrelationskoefficient. Der er tre figurer til hver pejleboring, den første figur viser korrelationen for hver måned, benævnes månedskorrelation, og de to sidste figurer viser de data, som korrelationen er udfærdiget på baggrund af, for januar og februar måned, hvor det er muligt. Korrelationerne for januar og februar måned analyseres nærmere, da det efter en umiddelbar inspektion af korrelationerne, vurderes at disse måneder har de højeste korrelationer, sammenholdt med tidshorisonten indtil årsminimumsvandføringen indtræffer. De er derfor relevante ift. en senere regressionsmodel.



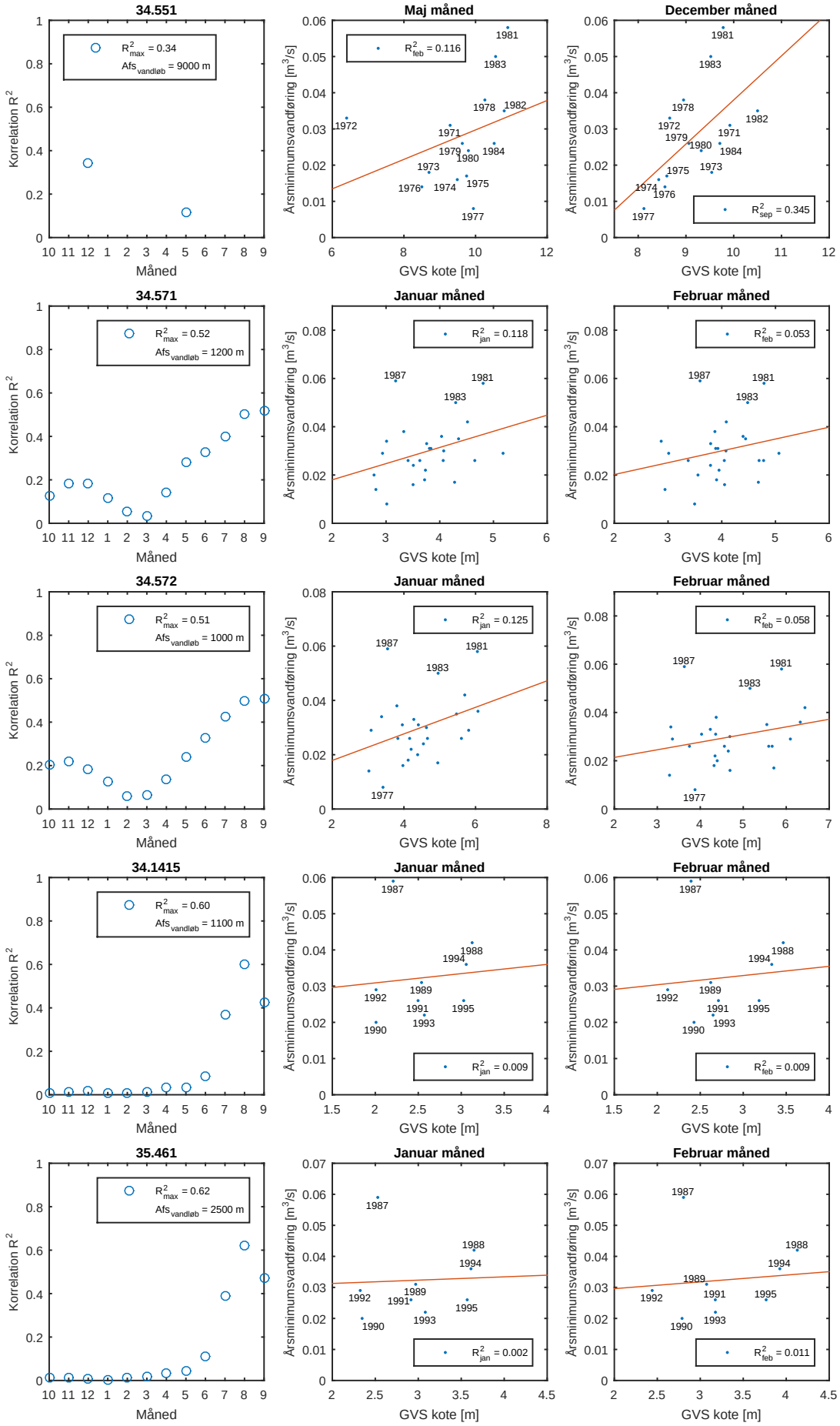
Figur 5.2. Korrelationsanalyser for Lindenborg Å.



Figur 5.3. Korrelationsanalyser for Lindenborg Å.



Figur 5.4. Korrelationsanalyser for Romdrup Å.



Figur 5.5. Korrelationsanalyser for Romdrup Å.

Korrelationen mellem årsminimumsvandføring og grundvandspotentiale er generelt højere ved Lindenborg Å end ved Romdrup Å. Det ses på mange af figurerne 5.2, 5.3, 5.4 og 5.5 at der forekommer en tendens til faldende forklaringsgrader i sen vinter/tidlig forår. Denne tendens er særligt interessant, da det var forventet af forklaringsgraden ville være stigende hen imod årsminimumsvandføring hændelsen. I det følgende kapitel vil årsagen til denne tendens blive undersøgt nærmere.

5.2 Opsamling

- Ved anvendelse af denne metode til bestemmelse af korrelation imellem pejledata og årsminimumsvandføring, ses tydeligt at der er en sammenhæng mellem pejleserier og årsminimumsvandføring, samt at styrken på korrelationen er månedsspecifik.

- Idet der er stor forskel på vandløbskarakteristikken for Romdrup Å og Lindenborg Å, se afsnit 4.1.1, ses også en tydelig forskel på styrken af korrelationen mellem årsminimum og pejleserierne. Det vurderes at denne forskel primært skyldes mængden af grundvand og regnvand der tilstrømmer vandløbene.

- Den tydeligste sammenhæng mellem årsminimumsvanføring og pejledata er til stede i oplandet til Lindenborg Å.

- Det kan ses i korrelationsanalysen at der forekommer nogle tydelige tendenser for sammenhængen mellem pejledata og årsminimumsvandføring hen over året, hvor den mest udtalte er tendensen til faldende korrelationer i sen vinter/tidlig forår.

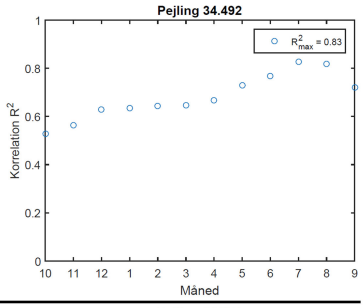
Analyse af tendenser fra korrelationsanalysen

6

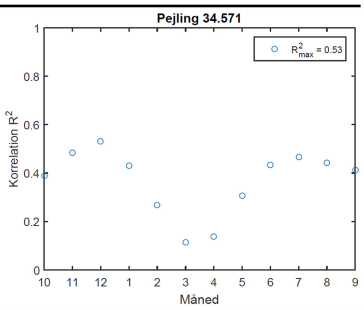
Det er påvist i kapitel 5, at der er en sammenhæng imellem grundvandspotentiale og årsminimumsvandføring. Dog viser analysen en tendens til faldende korrelationer i de sene vinter/forårs måneder. I dette kapitel undersøges årsagen til denne tendens. Forskellige aspekter af projektområdet analyseres, for at lokalisere om geologien eller påvirkning fra indvinding kan forårsage denne tendens. Herefter undersøges enkelte af de analyserede pejleserier, samt en pejleserie fra Volsted Plantage med daglige pejlinger.

For at undersøge forskellige årsager, opdeles pejleserierne i tre kategorier, baseret på udviklingen af korrelationerne hen over året. Der observeres generelt to forskellige tendenser, en tredje kategori er er lavet til de resterende:

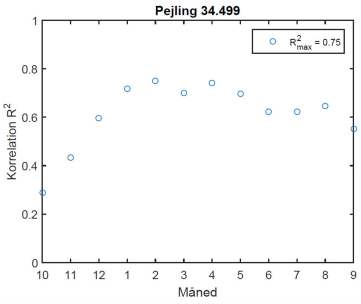
Tendens 1: *Stigende korrelation hen imod årsminimumsvandføringen.*



Tendens 2: *Faldende korrelation i de sene vinter/tidlige forårs måneder, og herefter stigende frem imod årsminimumsvandføringen.*



Tendens 3: *Ingen tydelig tendens.*

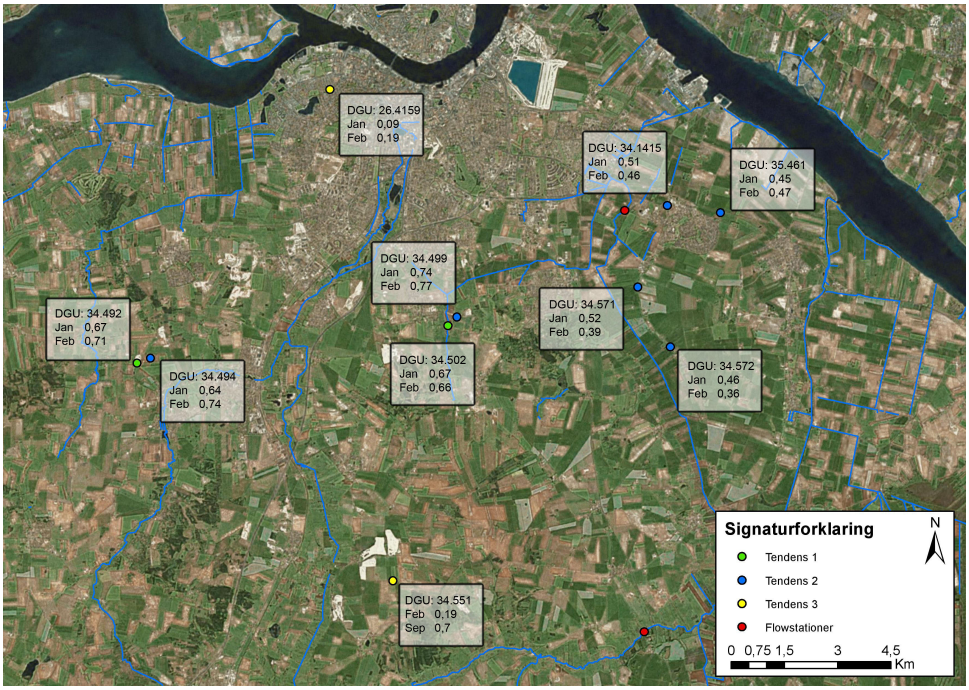


Figur 6.1. Der laves 3 kategorier af tendenser, som pejleserierne i korrelationsanalysen sorteres efter.

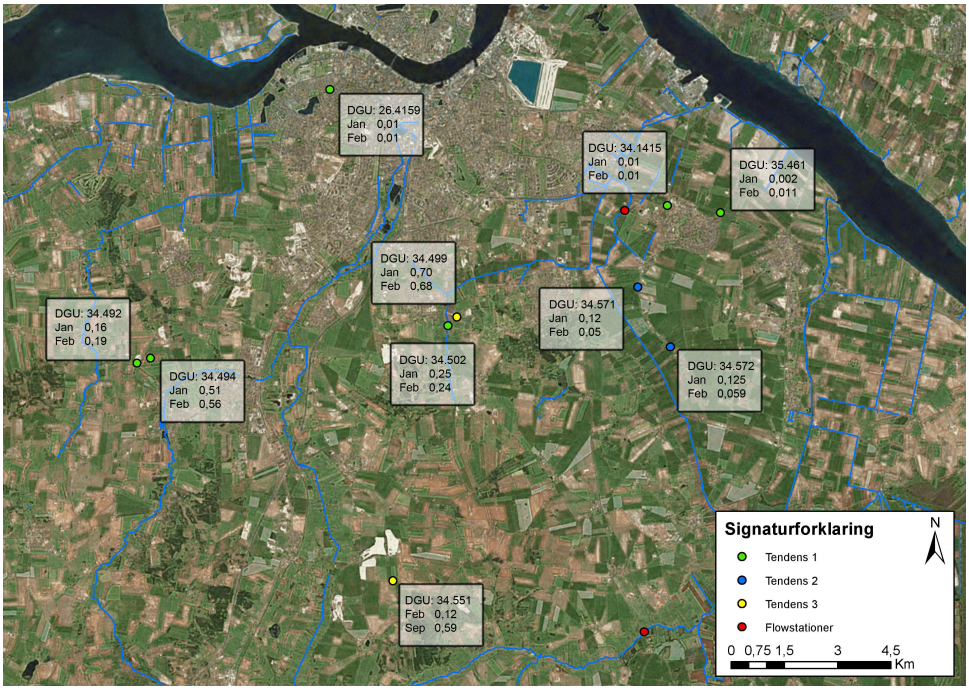
Årsagen til at der forekommer 2 markant forskellige tendenser kan være flere. Den mest logiske tendens er tendens 1, scenariet hvor korrelationen stiger hen imod måneden hvor

årsminimumsvandføringen indtræffer.

Det er illustreret på figur 6.2 for Lindenborg Å, og figur 6.3 for Romdrup Å, hvor de forskellige tendenser forekommer iht. placering af boringerne samt styrken af korrelationerne.



Figur 6.2. Korrelationer og tendenser for de udvalgte pejleboringer i projektområdet til Lindenborg Å.



Figur 6.3. Korrelationer og tendenser for de udvalgte pejleboringer i projektområdet til Romdrup Å.

Afstanden mellem pejleboring og vandløb er opmålt, men der ses ikke nogen sammenhæng mellem afstand og tendens. Ved de pejleboringer hvor tendensen er ens, er det undersøgt

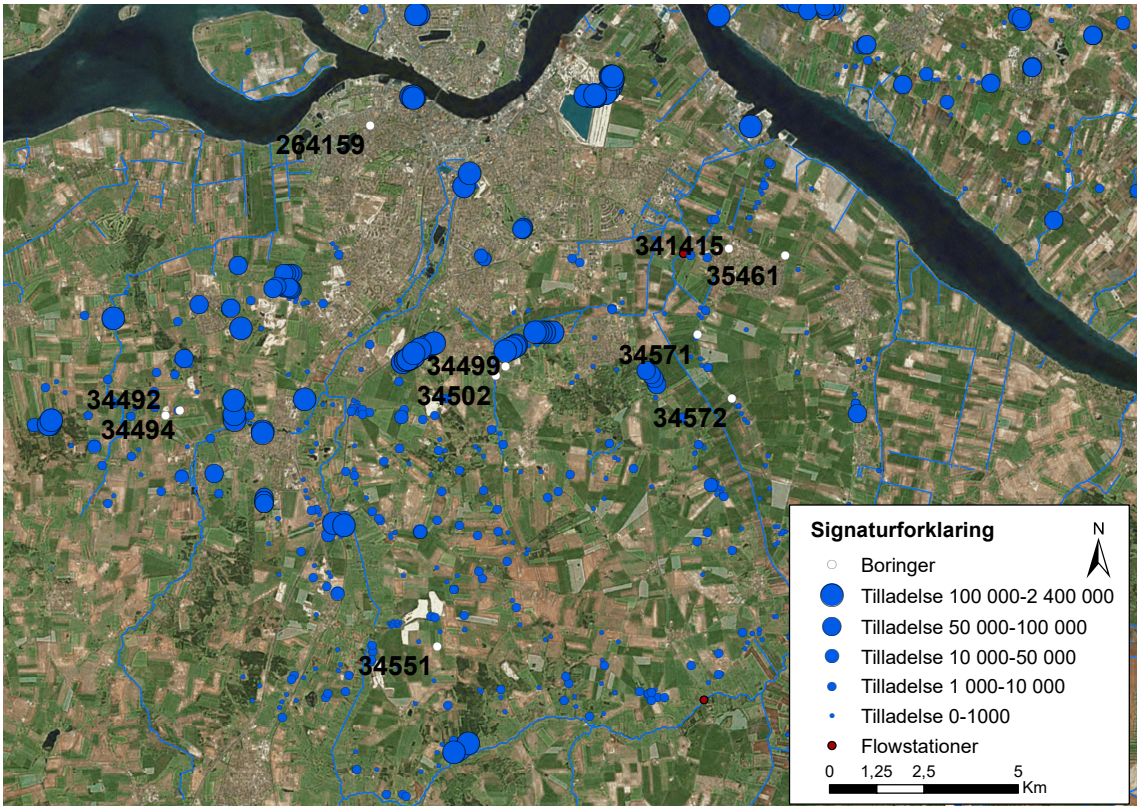
om tendenserne har tilbøjelighed til at fremkomme i bestemte områder, eventuelt grundet geologien. Korrelationer der er fremkommet ved sammenligning med Lindenborg Å, følger i den østlige del tendens 2, som det ses på figur 6.2. Det kan være at geologien i dette område har en betydning, men de restende tendenser er fordelt ud på området, så det kan også skyldes noget andet.

For tendenser, der er fremkommet ved korrelation mellem pejlinger og årsminimumsvandføringer i Romdrup Å, findes de højeste korrelationer i boring 34.494 og 34.499, og de har umiddelbart ikke noget tilfælles. Så en topografisk sammenhæng af styrken på korrelationerne mellem grundvandsstand og årsminimumsvandfring ved Romdrup Å er ikke til stede.

6.1 Påvirkning af grundvandspotentiale fra vandindvinding

I dette afsnit undersøges om placeringen af indvindninger har betydning for udviklingen af korrelationerne hen over foråret. Det undersøges om afstanden fra indvindingsboringerne til pejleboringerne og om størrelsen af indvindningerne har betydning for udviklingen af korrelationerne i forårsmånederne (tendens 2).

Indvindingsboringer i det sydlige Aalborg- og nordlige Rebild Kommune, sammen med pejleboringerne ses på figur 6.4.



Figur 6.4. Placering af indvindingsboringer ift. udvalgte pejleboringer.

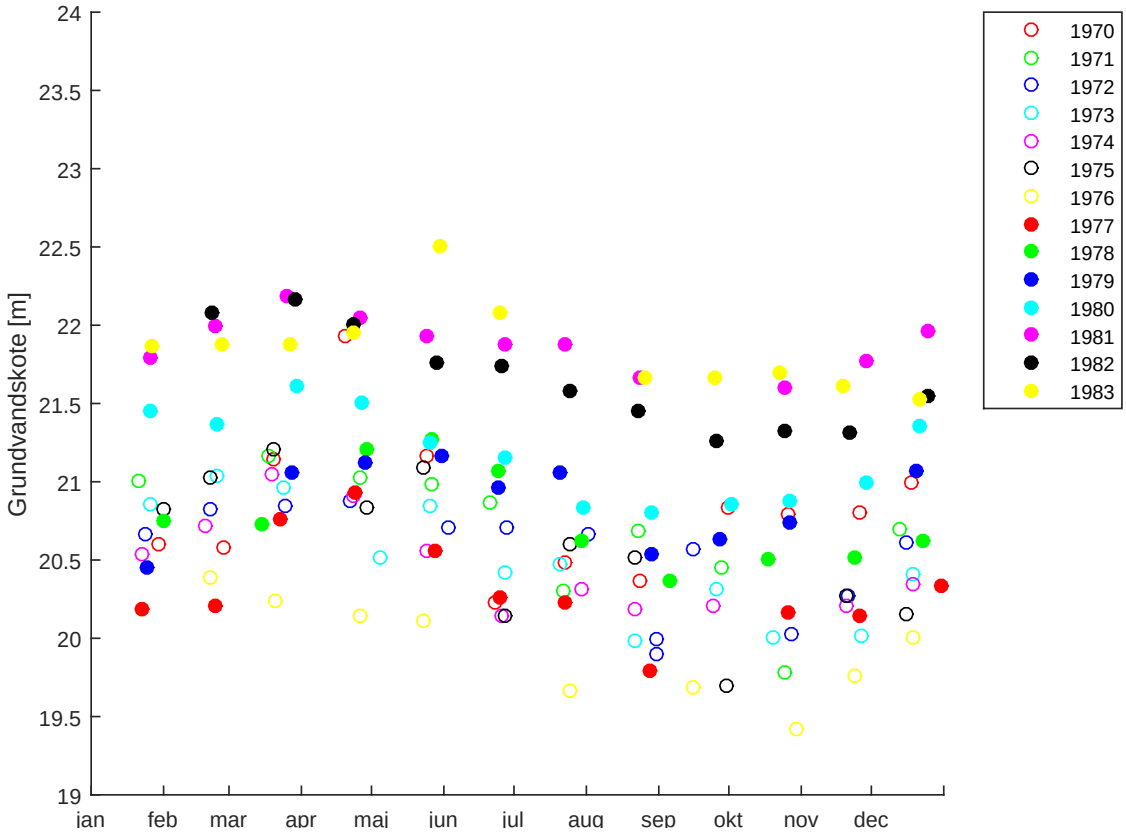
Korrelationen for boring 34.494, 34.499, 34.571 og 34.572 ved Lindenborg Å følger tendens 2. Det fremgår af figur 6.4 at alle disse boringer ligger meget tæt på indvindingsboringer, hvor boring 34.499, ligger tættest på en større indvindingsboring. Det tyder på at de bliver påvirket af indvindingsboringer tæt på og af en hvis størrelse. Det kan ikke bestemmes

hvilken tendens boring 34.551 følger, da der kun er to målinger om året. Det er den eneste pejleboring, hvor der også her ligger en indvindingsboring meget tæt på (indvindning overlapper markeringen for pejlingen).

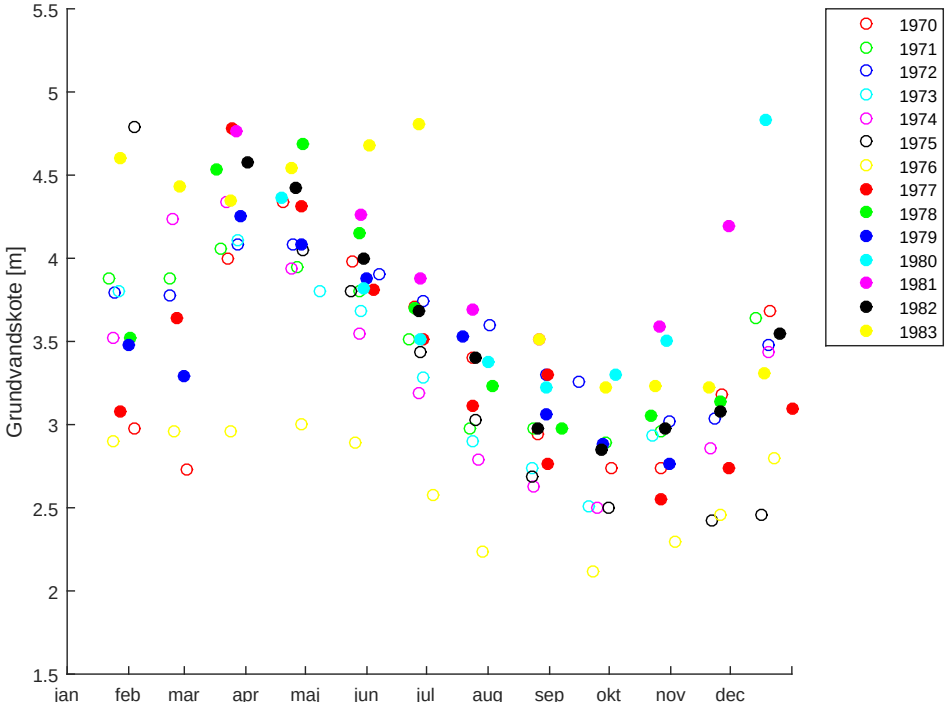
For Romdrup Å er det kun boringerne 34.571 og 34.572 der følger tendens 2. Det er ikke entydig den ene eller anden årsag til forkomsten af tendens 2, så det er fortsat uklart hvorfor korrelationerne fra visse pejleserier falder hen imod sommeren.

6.2 Undersøgelse af specifikke pejleserier

For at komme nærmere en forklaring på hvorfor tendens 2 forekommer, fokuseres der i dette afsnit på rådata for specifikke pejleserier. Der tages udgangspunkt i boring 34.492 (se figur 6.5), hvor tendens 1 forekommer ved både Lindenborg Å og Romdrup Å, og boring 34.571 (se figur 6.6), hvor tendens 2 forekommer ved både Lindenborg Å og Romdrup Å. Figurer for de restende boringer kan findes i Appendiks A.3. Figurerne viser grundvandsniveauet for alle pejlinger foretaget i boringen, og illustrerer samtidig årsvariationen i grundvandsmagasinet.



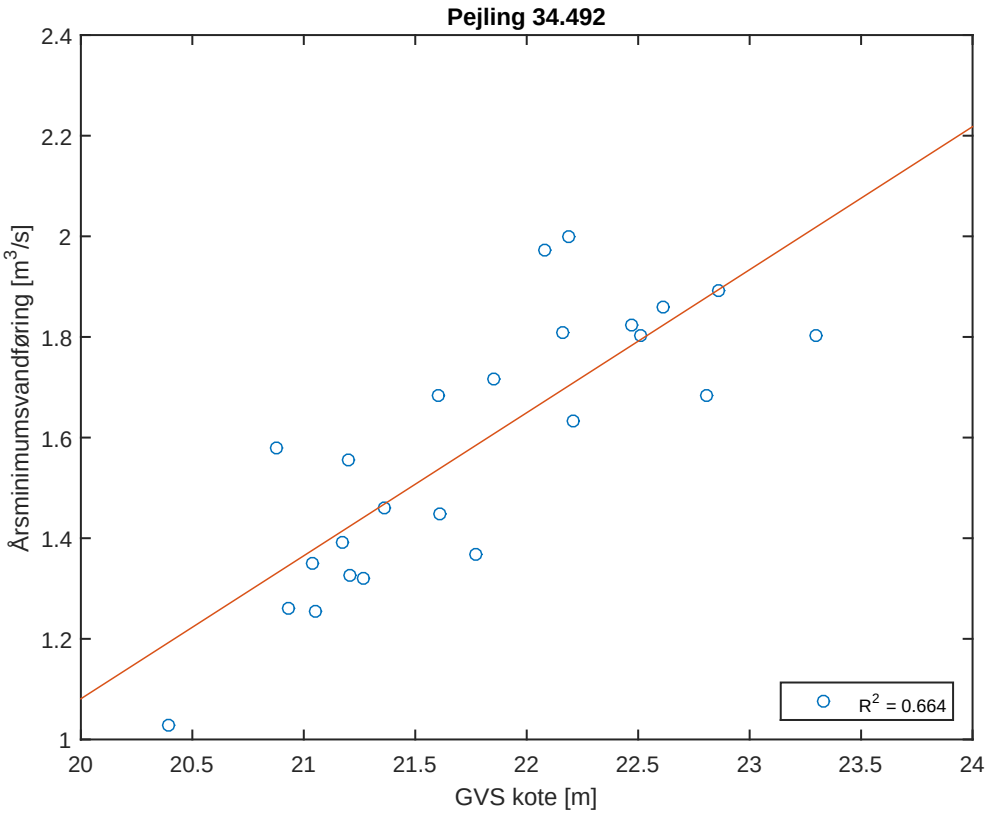
Figur 6.5. Observerede pejlinger for boring 34.492, hvor tendens 1 forekommer.



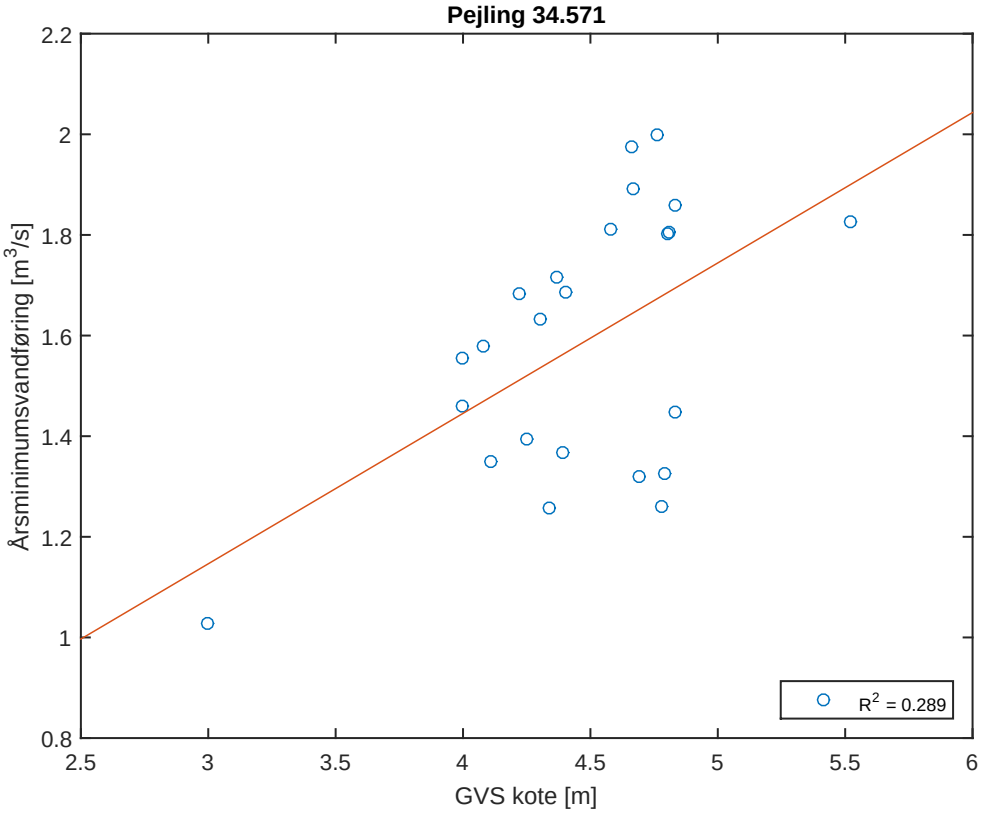
Figur 6.6. Observerede pejlinger for boring 34.571, hvor tendens 2 forekommer.

Det kan ses på figur 6.5 og 6.6, at den maksimale grundvandsstand i de fleste tilfælde forekommer i februar - maj. Forløbet af månedsvariationerne er forskelligt imellem de to pejleserier. Pejlingerne på figur 6.5 er ordnede (dvs. at månedsvariationerne fra år til år krydser sjældent ind over hinanden), med et mere konsekvent toppunkt omkring april, med undtagelse af nogle enkelte år. Pejlingerne på figur 6.6 er rodede (dvs. månedsvariationerne fra år til år har tendens til at krydse hinanden) og toppunkter varierer mellem flere måneder. Det ses ligeledes at den årlige variation (forskellen på pejlinger det samme tidspunkt på forskellige år) er signifikant, hvilket særligt ses på figur 6.5. Et enkelt år, 1983, skiller sig bemærkelsesværdigt ud i mange af pejleserierne, idet grundvandspotentialet når et maks meget sent på året, og derefter falder igen meget hurtigt.

Det er som tidligere beskrevet, uklart hvorfor de forskellige pejleserier varierer som de gør, omend det kan vurderes ud fra figur 6.5 og 6.6 at grundvandspotentialet gennemgår en stor ændring i forårsmånederne, som ikke nødvendigvis følger den samme tendens hvert år. Dette medfører at en pejling foretaget i den samme forårsmåned vil kunne repræsentere mange forskellige punkter på grundvandsstandsforløbet i den pågældende måned, og dermed give mere eller mindre tilfældige resultater. For at komme udenom dette, og da det samtidig ses at den maksimale pejling på figur 6.8 varierer meget fra år til år, udføres en korrelationsanalyse hvor den maksimale pejling uafhængig af måned, fra år til år, korreleres med årsminimumsvandføringen. Årsminimumsvandføringerne i Lindenborg Å og den årlige maksimalpejling er illustreret ved et scatterplot på figur 6.7 og 6.8. Analysen er foretaget i et Matlab script, der kan findes i appendiks A.2. Bemærk at der her udelukkende ses på årsminimumsvandføringen i Lindenborg Å, da denne vurderes repræsentabel for begge vandløb til denne analyse.



Figur 6.7. Korrelation med årsminimumsvandføring i Lindenborg Å, ved brug af den maksimale pejling hvert år for boring 34.492.

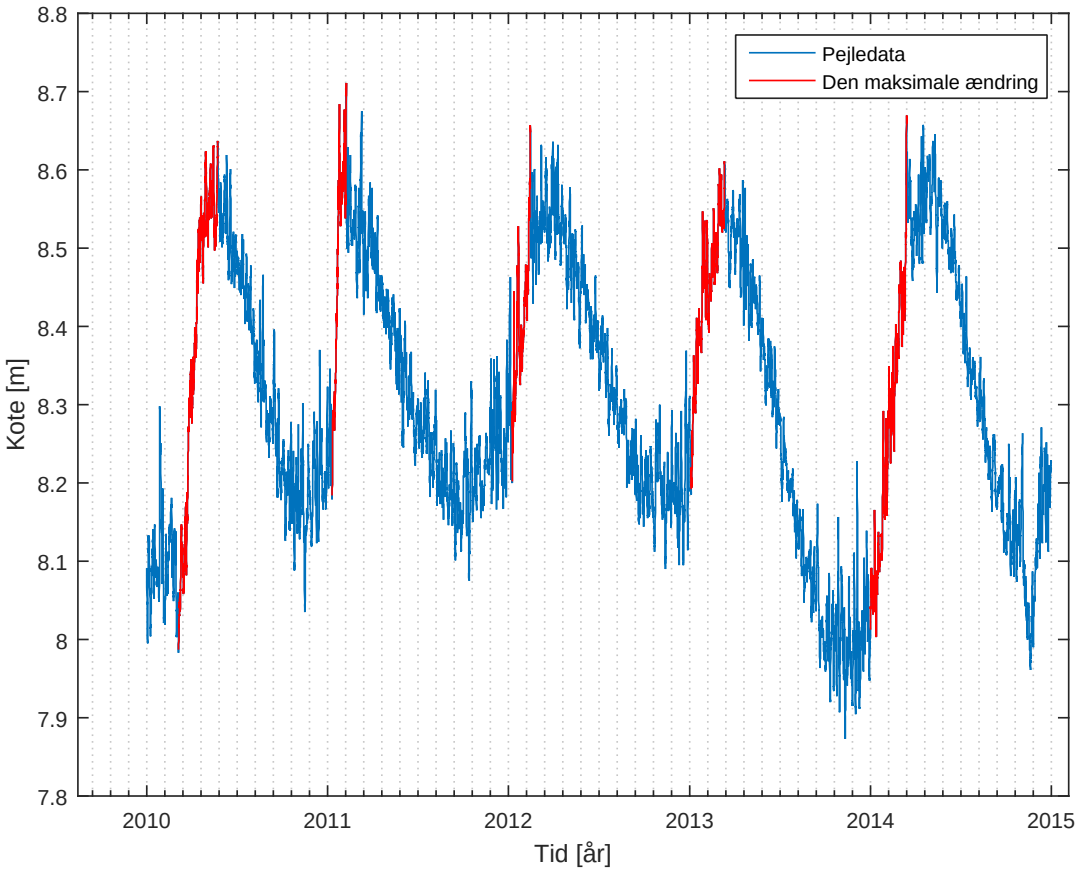


Figur 6.8. Korrelation med årsminimumsvandføring i Lindenborg Å, ved brug af den maksimale pejling hvert år for boring 34.571.

Ved at benytte den maksimale grundvandsstand for hvert år til korrelationen mellem årsminimumsvandføring og pejleserier, fås ikke en højere forklaringsgrad end ved brug af en middelpejling for hver måned. Iht. figur 5.2 og 5.3, forekommer den maksimale korrelation for boring 34.492 på 0,85 i april måned og for boring 34.571 på 0,57 i december måned. Dette indikerer at variationen på grundvandspotentialet i en given måned fra år til år, er en bedre indikator for årsminimumsvandføringerne end den maksimale grundvandsstand fra år til år uafhængigt af hvilken måned den optræder i. For at komme nærmere en forklaring på hvor stor variationen er, samt hvor hurtigt den indtræffer, undersøges en pejleserie med flere daglige pejlinger fra Voldsted Plantage i det følgende afsnit.

6.3 Undersøgelse af pejleserie fra Volsted Plantage

Endnu en mulig årsag til faldende korrelationer i forårsmånederne kan være den store variation på grundvandspotentialet der kan forekomme over relativt kort tid. De pejleserier der er analyseret i nærværende rapport, har ikke indeholdt nok pejlinger til at kunne give et præcist billede af månedsvariationerne i grundvandspotentialet. For at tegne et billede af hvor meget grundvandspotentialet er i stand til at variere, betragtes en pejleserie fra Volsted Plantage, hvor der er foretaget flere daglige pejlinger over en periode på flere år. Figur 6.9 illustrerer variationen i grundvandspotentialet over en årrække. Alle analyser baseret på Voldsted data er udført i et Matlab script og kan findes i appendiks A.4.



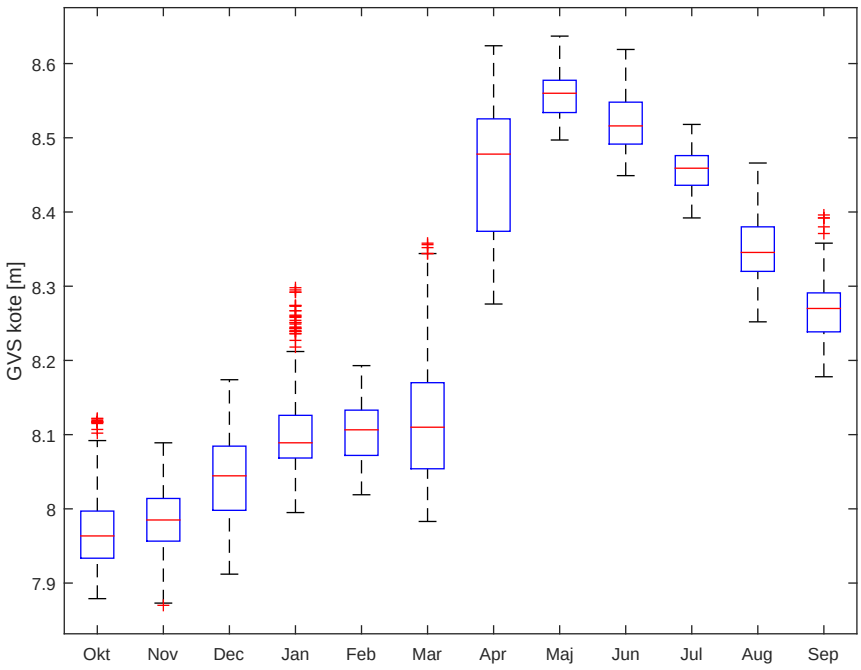
Figur 6.9. Udsnit af pejleserie fra Volsted Plantage med flere daglige pejlinger, dette giver et præcist billede af variationerne i grundvandspotentialet henover året. De data der er markeret med rød markerer den største hældning (største variation) over kortest tid hvert år.

Det ses tydeligt på figur 6.9 at en ændring i grundvandspotentialet kan slå igennem meget hurtigt, denne kraftige grundvandsdannelse i vinter og forårsmånederne er markeret med rød. Det ses f.eks. i starten af januar måned i 2011 at grundvandspotentialet stiger 0,5 meter på en meget kort periode, det ses samtidig at denne meget hurtige ændring slår igennem på forskellige tidspunkter. Det er tvivlsomt om det rent faktisk er muligt at ramme det samme sted på grundvandsstandsforløbet fra år til år. Derfor undersøges det, hvor lang tid denne kraftige stigning af grundvandspotentialet forekommer over, dette er beskrevet i tabel 6.1.

År	Varighed [dage]	Ændring [m]	Start	Slut
2010	79	0,65	Marts	Maj
2011	29	0,51	Januar	Februar
2012	37	0,45	Januar	Februar
2013	67	0,42	Januar	Marts
2014	73	0,65	Januar	Marts

Tabel 6.1. I denne tabel er varigheden af den største årlige grundvandsdannelse i dage angivet, hvor stor en ændring der er forekommet i perioden samt den første måned grundvandsdannelsen stiger og den måned grundvandsdannelsen aftager.

Det ses tydeligt i tabel 6.1 at der sker en stor ændring i grundvandspotentialet over relativt kort tid. Forskellen på den maksimale og det minimale grundvandspotentiale i Volsted Plantage i årene 2010 - 2014 er 0,84 meter, sammenholdt med den ændring der kan forekomme på blot nogle få måneder iht. tabel 6.1, ses det at variationen i vinter/foråret udgør 50-77% af den samlede variation. På figur 6.10 er der taget udgangspunkt i år 2010, og det er lavet et boksplot over samtlige pejlinger foretaget i hver måned, for at kunne vurdere månedsvariationen.



Figur 6.10. Ved brug af en enkelt pejling om måneden er det forbundet med stor usikkerhed at bestemme den reelle månedsvandstand, idet grundvandspotentialet varierer meget fra år til år. Her er der foretaget en korrelation mellem årsminimumsvandføring i Lindenborg å og alle pejlinger foretaget i en given måned over en seksårig periode.

Det ses tydeligt på figur 6.10, at den månedlige variation i nogle måneder er stor, og derfor medfører det en vis usikkerhed, at basere en model kun på en enkelt pejling i en given måned. Det er i marts- og april måned i 2010 ved Volsted Plantage, at variationen er størst. Den årlige variation af grundvandspotentialet er mere signifikant ift. bestemmelse af årsminimumsvandføring end grundvandsdannelsen i foråret. Derfor er det sandsynligt at store variationer i foråret i højere grad bidrager med støj ift. at identificere de årlige variationer, fremfor at bidrage med en højere forklaringsevne. I Volsted Plantage sker den største grundvandsdannelse hovedsageligt i januar - marts, men ved tidligere analyserede pejleserier forekommer denne grundvandsdannelse senere, hvilket fremgår i appendiks A.3. Det vurderes at en god metode til bestemmelse af input til en regressionsmodel er at foretage kontinuerlige pejlinger, med efterfølgende bestemmelse af en månedsmiddelpejling.

6.4 Opsamling

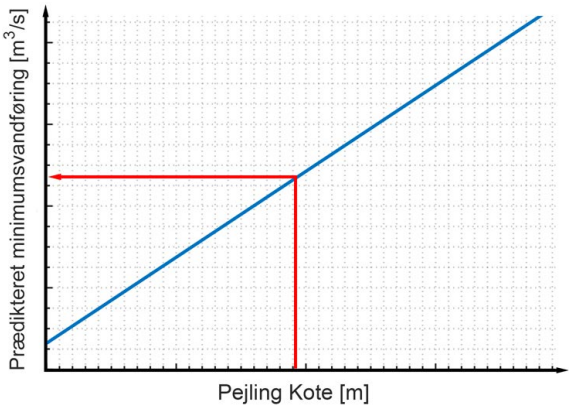
- Det vurderes på baggrund af analysen, at det er muligt at give en god prædiktion af årsminimumsvandføringen flere måneder før den forekommer.
- Der er ikke fundet en entydig forklaring på hvorfor tendens 2 forekommer.
- Det vurderes at det specielt er datakvaliteten, der har en betydning for forklaringsgraden i foråret, da ændringen i grundvandspotentialet i forårsmånederne forekommer over en meget kort periode. Derfor er det tilfældigt hvilken vandstand der pejles, da variationerne på en specifik måned kan variere meget, som det ses på figur 6.9, hvor variationen i vinter/foråret udgør 50 - 77 % af den samlede grundvandsvariation.
- Selvom forklaringsgraden er mindre i nogle af forårsmånederne, vurderes det at pejleserierne er anvendelige til en regressionsmodel.

Prædiktion af årsminimumsvandføringen 7

Det er bevist i kapitel 5, at der er en god korrelation mellem årsminimumsvandføring og grundvandspotentiale. Dette kapitel vil i forlængelse deraf omhandle udfærdigelsen af en prædiktionsmodel, baseret på lineær regression. Der ønskes udarbejdet en prædiktionsmodel, som er i stand til at estimere sommerminimumsvandføring, på baggrund af pejlinger foretaget i vinter/forårs månederne. De ti pejleserier, der igennem analysen i kapitel 5, har vist sig bedst egnet, er alle inkluderet i nærværende kapitel.

7.1 Forundersøgelse ift. valg af prædiktionsmodel

Den mest simple prædiktionsmodel der kan opstilles, er en lineær regressionsmodel baseret på en enkelt pejleserie. En sådan model er illustreret på figur 7.1.



Figur 7.1. Princippet for prædiktion af årsminimumsvandføringen. Ud fra en pejling tidligt på året kan årsminimumsvandføringen prædikteres.

En model som denne gør det muligt, med en hvis usikkerhed, at prædiktere årsminimumsvandføringen på baggrund af én pejling.

For at belyse om en kombination af flere pejleserier giver en bedre forklaringsevne, undersøges det, hvor mange pejleserier prædiktionsmodellen skal baseres på, for at give de bedste resultater.

For at undersøge hvor mange pejleserier der bør indgå i prædiktionsmodellen, udfærdiges en regressionsanalyse, hvor der først udarbejdes en model baseret på syv pejleserier. Der kan maksimalt anvendes syv pejleserier, idet ikke alle pejleserierne omfatter den samme periode, de syv anvendte pejleserier omfatter alle perioden '87 - '95. Metoden udføres herefter igen med de seks mest signifikante pejleserier, herefter fem osv. Signifikansniveauet bestemmes vha. ANOVA test [Brink, 2006]. Et udsnit af resultatet for Romdrup Å i december, ses i tabel 7.1. I tabellen illustreres princippet fra fem til én pejleserie.

Pejleserien i hvert step med den laveste signifikans er i tabellen markeret med rød. Alle øvrige resultater kan findes i appendiks A.5 og A.6.

Antal pejleserier	DGU nr. og p-værdi					R^2
5	34.492 0,44	34.502 0,44	34.571 0,35	35.461 0,12	34.1415 0,12	0,62
4	34.502 0,78	34.571 0,42	35.461 0,11	34.1415 0,11		0,53
3	34.571 0,29	35.461 0,07	34.1415 0,08			0,51
2	35.461 0,11	34.1415 0,11				0,38
1	34.1415 0,75					0,02

Tabel 7.1. Bestemmelse af signifikans for hver pejleserie ved forskellige modelkombinationer. Under hvert DGU nr. er signifikansen angivet, den laveste signifikans (den højeste talværdi) ved hver modelkombination er angivet med rød og er dermed sorteret fra i rækken under. Til højre for hver modelkombination er forklaringsgraden angivet. Pejleserierne er fra februar, og regressionsmodellen er udført for Romdrup Å i dette eksempel.

I tabel 7.1 ses en undersøgelse der er baseret på Romdrup Å, og pejledata fra december måned. Analysen er lavet både for Romdrup- og Lindenborg Å, og for december, januar og februar, og forklaringsgrader for alle regressionsmodellerne er angivet i tabel 7.2.

	Romdrup Å			Lindenborg Å		
Antal pejleserier	December	Januar	Februar	December	Januar	Februar
7	0,81	0,92	0,97	0,99	0,99	0,98
6	0,78	0,92	0,89	0,96	0,86	0,95
5	0,62	0,85	0,85	0,94	0,99	0,95
4	0,53	0,70	0,44	0,91	0,98	0,94
3	0,51	0,59	0,39	0,90	0,93	0,80
2	0,38	0,55	0,32	0,89	0,93	0,65
1	0,02	0,01	0,01	0,61	0,51	0,46

Tabel 7.2. Forklaringsgrader for alle regressionmodeller baseret på et forskelligt antal pejleserier.

Korrelationen er i samtlige analyser stærkest ved brug af syv pejleserier, dog er korrelationerne generelt stærkere ved Lindenborg Å end ved Romdrup Å. Ved begge vandløb er det største spring i korrelationen mellem to og en pejleserie, hvor der forekommer en betydelig forringelse. For at opnå en modelopbygning der er robust uanset om modellen skal prædiktere årsminimumsvandføringer i Romdrup- eller Lindenborg Å, samtidig med at der ikke ønskes en overkompliceret model (dvs. en model hvor det er overskueligt for en eventuel kunde at indsamle nødvendig data), benyttes tre pejleserier til prædiktionsmodellen.

Ved anvendelsen af ovennævnte metode kan der opnås en prædiktionsmodel med en god forklaringsevne, men idet det ønskes at inkludere flere faktorer i udvælgelsen af pejleserier, vil en mere grundig analyse af pejleserierne forekomme i det følgende afsnit. Det ønskes bl.a. at kombinationen af pejleserier der anvendes til modellen ikke blot viser et højt signifikansniveau, men også opfylder krav til antal af år modellen udfærdiges på baggrund af, samt grundlag for validering.

7.2 Prædiktionsmodel baseret på 3 pejlinger

Det er vurderet at modellen skal indeholde data fra tre forskellige pejleserier. Med data fra de ti pejleserier udvalgt i kapitel 5, medfører det 120 forskellige kombinationer, i både december, januar og februar. Alle disse er omfattet i en regressionsanalyse. Der er udført flere analyser for at tydeliggøre hvilke pejleserier, der er mest egnede til prædiktionsmodellen. Den metode der er vurderet bedst egnet, er beskrevet i det følgende afsnit, øvrige analyser er beskrevet i appendiks E. Analyserne er udfærdiget i Matlab scripts, se appendiks A.5.

I denne prædiktionsmodel er der lagt vægt på, at muligheden for validering af prædiktionsmodellen er tilstede. Dette er gjort ved at sikre, at der er tilgængelig data for andre perioder end den modellen er udfærdiget på baggrund af. Dette giver et stort datagrundlag for samtlige kombinationer, og dermed mindre risiko for tilfældighedsbetonede resultater. Resultatet af denne regressionsanalyse ses i tabel 7.3.

	Lindenborg Å					Romdrup Å				
	December									
Model	Kombination			R^2	p	Kombination			R^2	p
1	34.499	34.502	34.571	0,92	$2,58 \cdot 10^{-6}$	34.492	34.499	34.571	0,74	$1,75 \cdot 10^{-4}$
2	34.492	34.499	34.571	0,92	$2,99 \cdot 10^{-6}$	34.499	34.502	34.571	0,68	$5,68 \cdot 10^{-4}$
3	34.502	34.1415	35.461	0,90	$9,30 \cdot 10^{-5}$	34.492	34.499	34.502	0,63	$1,27 \cdot 10^{-3}$
	Januar									
Model	Kombination			R^2	p	Kombination			R^2	p
1	34.571	34.1415	35.461	0,96	$3,75 \cdot 10^{-6}$	34.492	34.499	34.502	0,75	$1,38 \cdot 10^{-4}$
2	34.492	34.1415	35.461	0,93	$2,30 \cdot 10^{-5}$	34.499	34.502	34.572	0,74	$1,60 \cdot 10^{-4}$
3	26.4159	34.1415	35.461	0,93	$3,26 \cdot 10^{-5}$	34.499	34.502	34.571	0,74	$1,74 \cdot 10^{-4}$
	Februar									
Model	Kombination			R^2	p	Kombination			R^2	p
1	34.492	34.499	34.502	0,83	$9,23 \cdot 10^{-5}$	34.499	34.571	34.572	0,83	$1,61 \cdot 10^{-5}$
2	34.492	34.499	34.572	0,82	$1,28 \cdot 10^{-4}$	34.499	34.502	34.572	0,80	$3,25 \cdot 10^{-5}$
3	34.492	34.499	34.571	0,82	$5,43 \cdot 10^{-5}$	34.492	34.499	34.572	0,80	$3,26 \cdot 10^{-5}$

Tabel 7.3. Forklaringsgraden ved forskellige kombinationer i regressionsmodellen, hvor kombinationerne er sorteret sådan at de højeste korrelationer er øverst. Modellerne er i rækkefølge, således at model 1 er først, dernæst model 2 og 3. P angiver signifikansniveauet for hver kombination.

Resultaterne i tabel 7.3, viser en stor forskel på forklaringsgraden ved Lindenborg Å og Romdrup Å. Forklaringsgraden er ved Lindenborg Å mellem 0,82 - 0,96 og ved Romdrup Å mellem 0,63 - 0,83. For at kunne vælge den bedst mulige model løsning, udføres statistik på de prædikterede vandføringer, beregnet med en valideringsmodel. Valideringsmodellen er udført ved udeladelse af det år der fremskrives i, samt beregning af årsminimumsvandføring i år der ikke er inkluderet i de år modellen er udfærdiget på baggrund af. Resultatet kan ses i tabel 7.4. I tabellen fremgår de samme kombinationer som i tabel 7.3, her med en analyse af modelresidualerne.

På baggrund af tabel 7.3 og 7.4 udvælges de modeller der vurderes bedst egnede til prædiktion af årsminimumsvandføringen i Lindenborg- og Romdrup Å. For Lindenborg Å udvælges kombination 3 i december, da denne kombination giver de laveste residualer i valideringen. Af samme årsag vælges kombination 1 i februar for Romdrup Å.

	Lindenborg Å			Romdrup Å		
December						
Model	**Middel [%]**	**Min [%]**	**Max [%]**	**Middel [%]**	**Min [%]**	**Max [%]**
1	19	4	39	54	31	100
2	17	1	32	47	21	82
3	9	1	17	47	0	96
Januar						
Model	**Middel [%]**	**Min [%]**	**Max [%]**	**Middel [%]**	**Min [%]**	**Max [%]**
1	11	5	17	39	5	100
2	10	3	16	75	16	135
3	11	6	17	44	5	131
Februar						
Model	**Middel [%]**	**Min [%]**	**Max [%]**	**Middel [%]**	**Min [%]**	**Max [%]**
1	11	3	20	17	5	61
2	10	1	19	19	0	63
3	10	2	20	19	0	63

Tabel 7.4. Statistik på model valideringen, anvendes til at bestemme den bedste modelkombination til prædiktionsmodellen. Det ses at modelresidualerne ikke nødvendigvis er lavest ved de modelkombinationer der viser den højeste forklaringsgrad i tabel 7.3. Model nummereringen 1, 2 og 3 svarer til kombinationerne i tabel 7.3.

Resultater og den endelige validering af modellerne fremgår af de to følgende tabeller 7.5 og 7.6. Her er årsminimumsvandføringerne først beregnet med den valgte model og det samlede datasæt, dernæst er årsminimumsvandføringen beregnet for et år af gangen ved ekskludering af det pågældende år fra modellen, dette benyttes til validering. Ydermere findes nyere pejledata, som ligeledes benyttes til validering. Residualerne af den validerede årsminimumsvandføring og den procentvise afvigelse er beregnet og vist i tabellerne.

År	**Obs**	**Model**	**Validering**	**Residualer**		**Procent**	
	[l/s]	[l/s]	[l/s]	Model	Validering	Model	Validering
1987	1716	1657	1634	59	82	3	5
1988	1893	1929	1987	-36	-94	-2	5
1989	1634	1719	1749	-85	-115	-5	7
1990	1368	1403	1451	-35	-83	-3	6
1991	1683	1680	1679	3	4	0	0
1992	1555	1521	1501	34	54	2	3
1993	1460	1500	1584	-40	-124	-3	8
1994	1685	1643	1626	42	59	2	4
1995	1803	1745	1578	58	225	3	12
1996	1426	-	1533	-	-107		8
2006	1686	-	1970	-	-284		17
2007	1912	-	1936	-	-24		1

Tabel 7.5. Model for Lindenborg Å baseret på pejleserierne fra 34.502, 34.1415 og 35.461. Årsminimumsvandføringen er fremskrevet fra december måned. Model kolonnen er årsminimumsvandføringer beregnet i model perioden, hvor alle data er inkluderet. Årsminimumsvandføringen er valideret fra årene 1987-1995 ved at fjerne et år ad gangen, og de tre sidste år er bestemt ud fra den oprindelige model. Værdier under den horisontale linje, indikerer prædikterede vandføringer ud over perioden modellen er baseret på. Middelfejlen er 105 og RMS 129,36.

År	Obs	Model	Validering	Residualer		Procent	
	[l/s]	[l/s]	[l/s]	Model	Validering	Model	Validering
1970	34	29	24	5	10	15	29
1971	31	28	28	3	3	9	11
1972	33	24	22	9	11	27	32
1973	18	24	26	-6	-8	-34	44
1974	16	14	13	2	3	12	16
1975	17	21	24	-4	-7	-26	43
1976	14	19	21	-5	-7	-33	47
1977	8	10	11	-2	3	-26	35
1978	38	31	30	7	8	17	21
1979	26	36	40	-10	-14	-38	53
1980	24	21	19	3	5	14	22
1981	58	57	55	1	3	2	5
1982	35	38	39	-3	-4	-8	11
1983	50	-	57		-7		14
1986	29	-	31		-2		7
1988	42	-	17		26		61
1990	20	-	21		-1		5
1991	26	-	31		-5		19
1997	33	-	35		-2		5
2007	72	-	66		6		8

Tabel 7.6. Model for Romdrup Å baseret på pejleserierne fra 34.499, 34.571 og 34.572. Årsminimumsvandføringen er fremskrevet fra februar måned. Model kolonnen er årsminimumsvandføringer beregnet i model perioden, hvor alle data er inkluderet. Årsminimumsvandføringen er valideret fra årene 1970-1982 ved at fjerne et år ad gangen, og de restende år er bestemt ud fra den oprindelige model. Værdier under den horisontale linje, indikerer prædikterede vandføringer ud over perioden modellen er baseret på. Middelfejlen er 7 og RMS 8,56.

Det ses i tabellerne 7.5 og 7.6, at residualerne af valideringen ikke afviger bemærkelsesværdigt, ift. modelresidualerne, men i alle tilfælde er afvigelsen større. Samtidig kan det observeres at residualerne under den horisontale linje i tabellerne (indikerer prædiktioner ud over model perioden), ikke afviger betydeligt fra residualerne i modelperioden. Middelafvigelsen for Lindenborg Å i valideringskolonnen i tabel 7.5, er i modelperioden 93 l/s og 138 l/s i de efterfølgende tre år. For Romdrup Å, tabel 7.6, er middelafvigelsen 6,6 l/s i modelperioden og 7 l/s i de efterfølgende år.

Generelt indikerer disse resultater at modellernes prædiktionsevne er god, samt at forskellen på valideringsresultaterne og modelresultaterne er små, hvilket indikerer at overfitting ikke forekommer. Prædiktionsevnen er relativt mest præcis for Lindenborg Å, hvor den maksimale afvigelse er 17 %, men med en middel afvigelse, i de år modellen er baseret på, nede omkring 6 %. Ved en betragtning af Romdrup Å, ses generelt en forværret prædiktionsevne, med afvigelser i februar på op til 61 %. De endelige prædiktionsmodeller har struktur som formel 7.1.

$$Q_{predic} = I + x_1 \cdot p_1 + x_2 \cdot p_2 + x_3 \cdot p_3 \tag{7.1}$$

Hvor

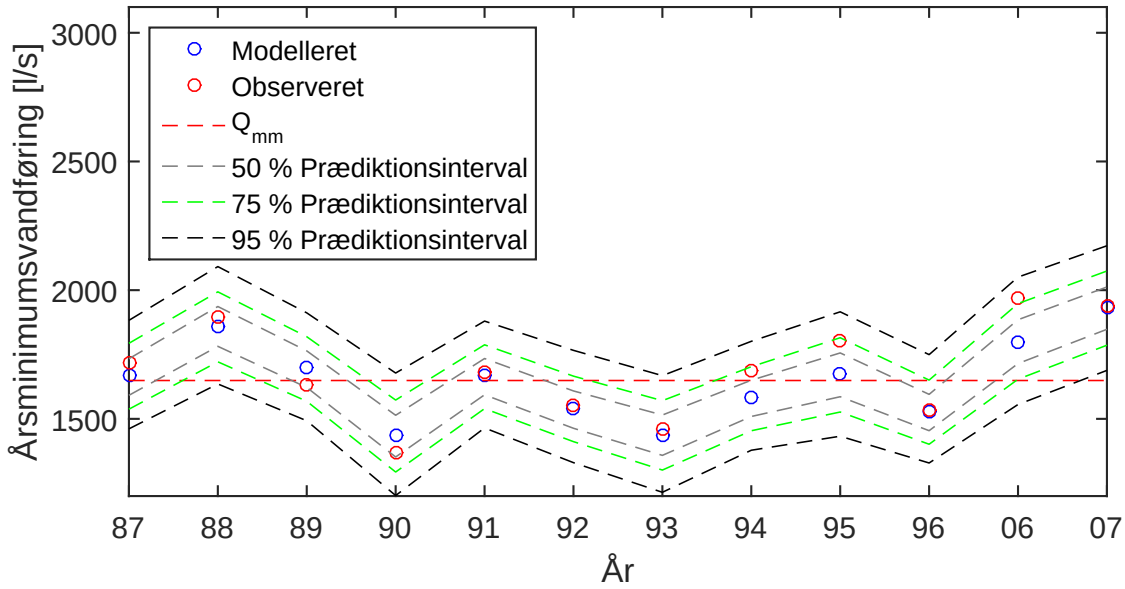
Q_{predic}	Prædikteret årsminimumsvandføring	[l/s]
I	Skæring	[-]
x_n	Regressionsparameter	[-]
p_n	Observeret pejling	[m]

Regressionsparametrene for de to udvalgte modeller er beskrevet i tabel 7.7.

Parameter	Lindenborg-December	Romdrup-Februar
I	0,94	-0,16
x_1	-0,04	0,03
x_2	3,93	0,02
x_3	-2,98	-0,02

Tabel 7.7. Regressionsparametre for de tre udvalgte modeller.

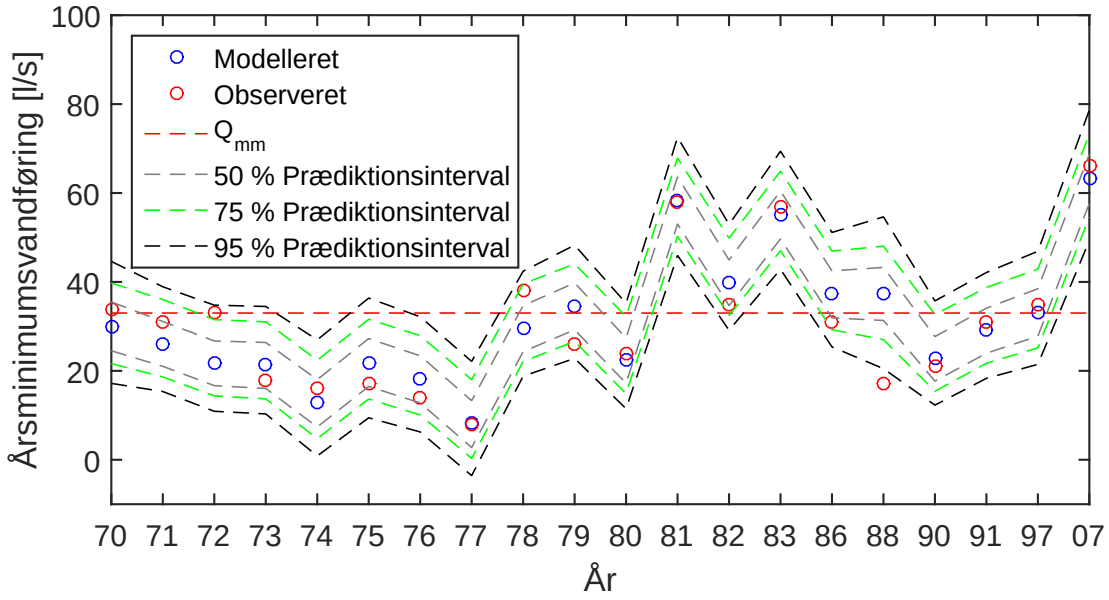
For bedre at være i stand til at vurdere modellens prædiktionsevne er modellens prædiktionsintervaller beregnet vha. et Matlab script, se appendiks A.5, baseret på teori fra Stine [1985]. Metoden er baseret på percentil bootstrapping, og er ikke parametrisk. Prædiktionsintervallerne er beregnet på baggrund af udtræk af bootstrappede model residualer. Resultatet kan ses for de to modeller på figur 7.2 og 7.3, hvor et 50 %, 75% og 95 % prædiktionsinterval er beregnet på baggrund af 10.000 bootstrapninger.



Figur 7.2. Prædiktionsintervaller for modellen baseret på december, til prædiktion af årsminimumsvandføring i Lindenborg Å. Det ses at alle prædikterede vandføringer befinder sig inden for 95% prædiktionsintervallet.

Jævnfør figur 7.2, er alle de prædikterede vandføringer inden for 95% prædiktionsintervallet, og kun nogle få er uden for 50% og 75% prædiktionsintervallet. Den største afvigelse for de år der ligger inden for modelperioden er 225 l/s eller 12 % i 1995, sammenlignet med den største afvigelse for valideringsårene, som er på 284 l/s, eller 17 % i 2006. Der kan være nogle modellerede vandføringer der enkelte år, falder uden for prædiktionsinter-

vallet, hvilket er forventeligt. Prædiktionsevnen er generelt bedre for Lindenborg Å end for Romdrup Å. På figur 7.3 ses det at kun en enkelt af de prædikterede vandføringer falder uden for 95% prædiktionsintervallet, og kun nogle få prædiktioner falder uden for 75% prædiktionsintervallet.



Figur 7.3. Prædiktionsintervaller for modellen baseret på februar, til prædiktion af årsminimumsvandføring i Romdrup Å

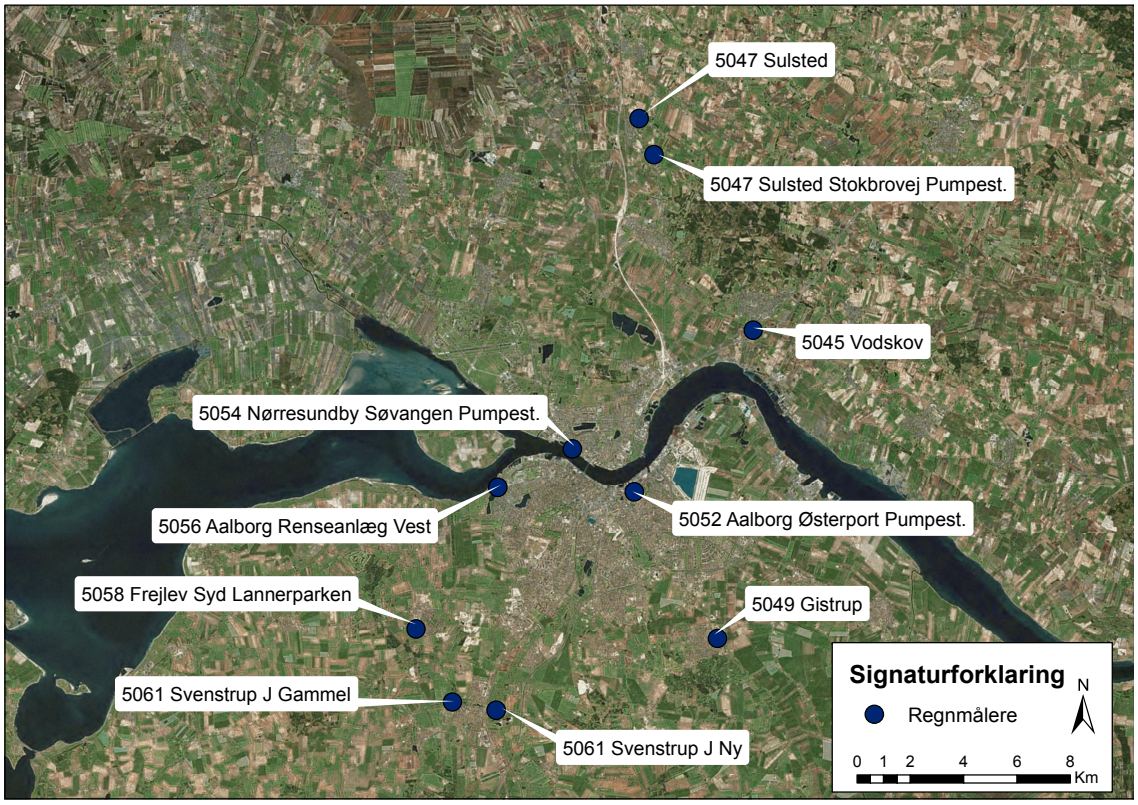
Ved prædiktion af årsminimumsvandføringer i Romdrup Å, er der flere år hvor årsminimumsvandføringen afviger så meget fra medianminimumsvandføringen, at denne ikke ligger inden for 95% prædiktionsintervallet. Det kan derfor prædikteres med stor sikkerhed at årsminimumsvandføringen flere år er betydeligt højere/lavere end medianminumsvandføringen. Dette betyder at variable indvindingstilldelser baseret på prædikteret årsminimumsvandføring i Romdrup Å, vil have en positiv effekt på vandføringsvariationen.

Idet modellerne i et enkelt år beregner årsminimumsvandføringen upræcist, bør det overvejes hvilke parametre der har betydning for årsminimumsvandføringen ud over grundvandspotentialet (f.eks. nedbør, fordampning eller vandindvinding). Det er i den forbindelse interessant, at undersøge om nedbør spiller en væsentlig rolle ift. prædiktionsevnen af modellerne. Outliers er særligt repræsenterede ved fremskrivning af årsminimumsvandføringen i Romdrup Å, og da nedbør mistænkes for at spille en rolle, analyseres historisk nedbør fra projektområdet i det følgende afsnit.

7.3 Nedbørs påvirkning af årsminimumsvandføring

For at undersøge hvor meget de årlige årsminimumsvandføringer er påvirket af nedbør, analyseres historiske nedbørshændelser. Årsminimumsvandføringer sammenlignes med nedbør fra forskellige perioder før og til årsminimumsvandføringen optræder. Årsnedbøren er hentet for årene 1990-2012 fra DMI Klimagrid (celle 10274), hvor regnen er korrigeret for læ og vind. Regndata fra før år 1990 er midlet over de SVK regnmålere der ses på figur 7.4. Efterfølgende er regndata fra SVK målere korrigeret med en korrektionsfaktor på 1,2 ift. data fra Klimagrid, således regndata fra de to forskellige kilder er sammenlignelige.

Dette er nødvendigt idet regndata fra SVK regnmålere ikke er korrigeret for læ og vind. [Institut, 2008] Databehandlingen er foretaget i Matlab scripts og kan findes i appendiks A.7.



Figur 7.4. Placering af regnmåler i Aalborg og omegn.

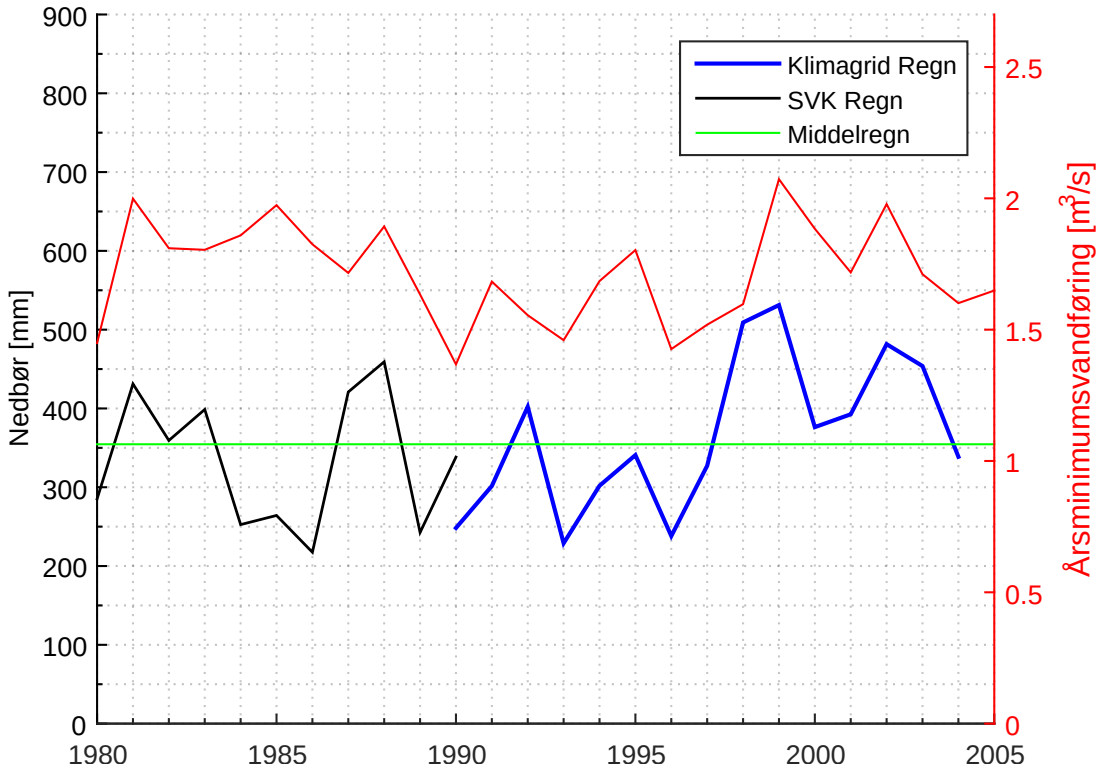
7.3.1 Sammenhæng mellem årsminimumsvandføring og nedbør

Nedbør fra forskellige perioder før årsminimumsvandføringen optræder er analyseret, og det vurderes at den bedste sammenhæng mellem årsminimumsvandføring og nedbør, optræder når nedbørsdata benyttes fra fem måneder før og til årsminimumshændelsen indtræffer. Resultatet af analysen ses i tabel 7.8, hvor korrelationen mellem årsminimumsvandføring og nedbør fra forskellige perioder er illustreret.

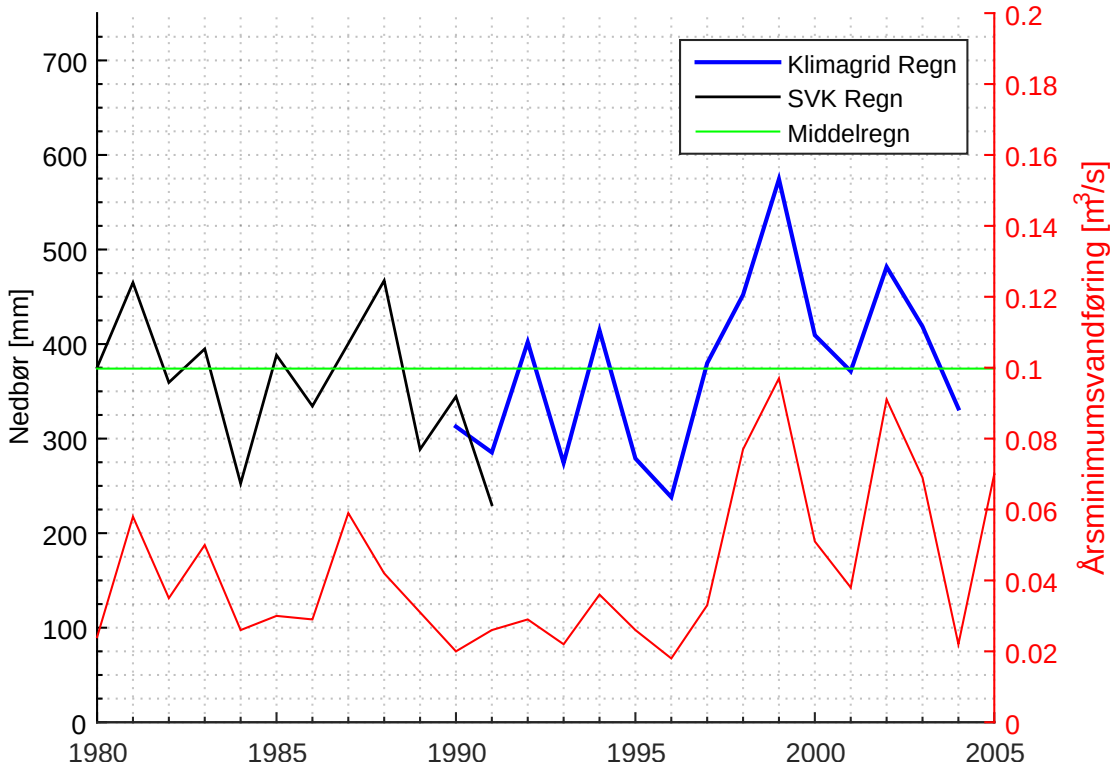
	Korrelation R^2	
	Lindenborg Å	Romdrup Å
1 måned før	0,01	0,06
2 måneder før	0,02	0,10
3 måneder før	0,12	0,21
4 måneder før	0,19	0,53
5 måneder før	0,23	0,66
6 måneder før	0,13	0,48

Tabel 7.8. Korrelation mellem nedbør og årsminimumsvandføring fra forskellige perioder før årsminimumsvandføringen indtræffer.

Det er bemærkelsesværdigt at sammenhængen mellem nedbør og årsminimumsvandføring bliver bedre idet nedbørsdata fra en længere periode medtages. Det er samtidig meget tydeligt at den bedste sammenhæng kan ses ved Romdrup Å, hvilket var forventeligt. På figur 7.5 ses årsminimumsvandføringen i Lindenborg Å og nedbøren fra fem måneder før og til årsminimumsvandføringen indtræffer, tilsvarende for Romdrup Å ses på figur 7.6.



Figur 7.5. Årsminimumsvandføring i Lindenborg Å sammenlignet med nedbøren fra fem måneder før og frem til årsminimumshændelsen forekommer. Den del af regnen der er midlet fra SVK's målere er markeret med sort og nedbøren fra klimagrid 10274 er markeret med blå. Nedbøren fra SVK målere er korrigeret således at den er sammenlignelig med nedbøren fra DMI Klimagrid.



Figur 7.6. Årsminimumsvandføring i Romdrup Å sammenlignet med nedbøren fra fem måneder før og frem til årsminimumshændelsen forekommer. Den del af regnen der er midlet fra SVK's målere er markeret med sort og nedbøren fra klimagrid 10274 er markeret med blå. Nedbøren fra SVK's målere er korrigeret således at den er sammenlignelig med nedbøren fra klimagrid 10274.

Ved Lindenborg Å kan mængden af nedbør der falder op til årsminimumshændelsen kan potentielt påvirke årsminimumsvandføringen. Det er illustreret på figur 7.5, at der de år hvor der falder meget nedbør, i flere tilfælde også forekommer en højere årsminimumsvandføring. Det ses bl.a. ved år 1995, at en stigning i mængden af nedbør også forårsager en højere årsminimumsvandføring. Betragtes tabel 7.5, ses det at den prædikterede vandføring i 1995 netop afviger fra den observerede årsminimumsvandføring. Det kan derfor ikke afvises at nedbørshændelser der forekommer efter en eventuel middelpejling i vinter/forår spiller en rolle ift. årsminimumsvandføringen i Lindenborg Å.

Ved Romdrup Å er det generelt tydeligere at se sammenhængen mellem nedbør og årsminimumsvandføringen, idet årsminimumsvandføringen her i højere grad varierer, se afsnit 4.1. Betragtes tabel 7.6 ses det at den prædikterede årsminimumsvandføring særligt afviger i år '80, '88 og '91. Det ses særligt at der i år '91 har været begrænsede mængder nedbør, og at årsminimumsvandføringen derfor har været særligt lav. Dette har bevirket at prædiktionsmodellen har overestimeret årsminimumsvandføringen. I '88 ses det modsatte, at en stor mængde nedbør har forårsaget en høj årsminimumsvandføring, og modellen har derfor underestimeret årsminimumsvandføringen.

Scatterplots af sammenhængen mellem regn og årsminimumsvandføringen samt tabeller med nøgletal for Lindenborg Å og Romdrup Å findes i Appendiks F.

Det er undersøgt om den endelige prædiktionsmodel, hvor nedbør er inkluderet, giver en forbedret forklaringsevne. Dette har vist sig ikke at være tilfældet iht. appendiks F.1. Dette kan skyldes at nedbøren har en mindre forudsigelig karakter end grundvandspotentiale.

Det er hermed vist hvordan det er muligt at fremskrive årsminimumsvandføringer, hvilket er nødvendigt for at være i stand til at vurdere om det er muligt at indvinde mere vand i perioder. Ved implementering af "vandplan 2 metoden" til bestemmelse af indvindingstilladelser, er kriteriet for vandindvinding revideret, og det er derfor ikke tilstrækkeligt kun at kunne fremskrive årsminimumsvandføringer. Det følgende kapitel vil indeholde en analyse af parametrene der indgår i "vandplan 2 metoden".

7.4 Opsamling

- Modellerne til prædiktion af årsminimumsvandføring i Lindenborg- og Romdrup Å, viser generelt en acceptabel prædiktionsevne.
- Generelt er der bedre forudsætninger for at fremskrive årsminimumsvandføringen i Lindenborg Å frem for Romdrup Å, da Lindenborg Å i højere grad er grundvandsfødt og dermed mindre påvirkelig af faktorer som nedbør.
- Modellen med den bedste forklaringsevne for Lindenborg Å er udfærdiget for december måned, hvorimod den model med den bedste forklaringsevne for Romdrup Å er bestemt i februar.
- Variationer i nedbør i forårsmånederne har en påvirkning på årsminimumsvandføringen.

- Det er påvist at nedbør fra 5 måneder før årsminimumshændelsen og indtil årsminimumshændelsen indtræffer giver den bedste forklaringsgrad med vandføringen i vandløb. Dette medfører dog ikke at det altid er alt nedbør i denne periode der påvirker årsminimumsvandføringen mest. Det kan ligeså vel være kraftige regnhændelser i måneden før årsminimumshændelsen indtræffer der har endelig betydning for årsminimumshændelsens størrelse. Dette kan der dog på nuværende tidspunkt ikke tages højde for i en regressionsmodel, og derfor risikeres der, at en inkludering af nedbør i modellen bidrager med mere støj end forklaringsevne.

Parameteranalyse - Vandplan 2 Metode

8

I kapitel 7 er det påvist at det er muligt, at lave en prædiktionsmodel der er i stand til at prædiktere årsminimumsvandføringer, op til et halvt år før de forekommer. Årsminimumvandføringen er i dag nøgleparameteren til estimering af påvirkningen af den våde natur ved udstedelse af indvindingstilladelser. Der er dog stor sandsynlighed for, at dette vil ændre sig inden for den nærmeste fremtid (i vandplanernes 2. planperiode, som tidligere beskrevet i afsnit 3.3.2). Det er derfor relevant, at undersøge om variable indvindingstilladelser kan implementeres, ved overgang til vandplan 2 metoden og i den forbindelse om det er muligt at udfærdige prædiktionsmodeller, der kan prædiktere de parametre der er anvendt i vandplan 2 metoden. Det er erfaret igennem tidligere udførte analyser, at Romdrup Å udgør en større udfordring ift. prædiktering af årsminimumsvandføring end ved Lindenborg Å, og idet Romdrup Å også er det vandløb det har den mest varierende vandføringskarakteristik, se afsnit 4.1.1, vil dette kapitel koncentreres om dette vandløb.

8.1 Parametre i vandplan 2 metoden

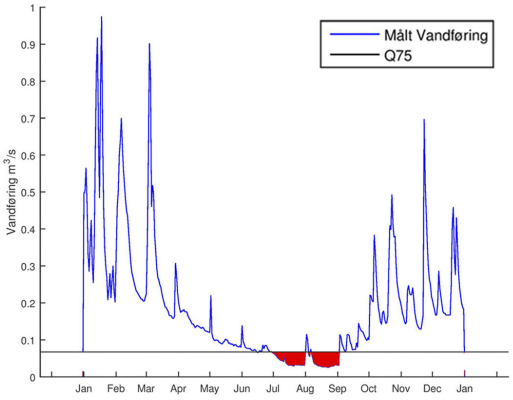
Det er påvist i Grøber et al. [2014] at seks hydrologiske variabler, sammen med syngningsgraden er i stand til at give den bedste beskrivelse af vandløbs økologiske status. Slyngningsgraden har til formål at repræsentere de fysiske faktorer i vandplan 2 modellen, se afsnit 3.3.2. Der anvendes fire klasser af slyngningsgrad i modellen, se tabel 8.1. De øvrige parametre er beregnet vha. et matlab script, som kan findes i appendiks A.1.

Klasse	Slyngningsgrad(Sin)	Klassegrænser (vandløbslængde/lineær afstand)
1	Lige - kanaliseret	Sin $<$ 1,05
2	Svagt sinuøst (slynget)	1,05 $<$ Sin $<$ 1,25
3	Sinuøst	1,25 $<$ Sin $<$ 1,50
4	Mæandrerende	Sin $>$ 1,50

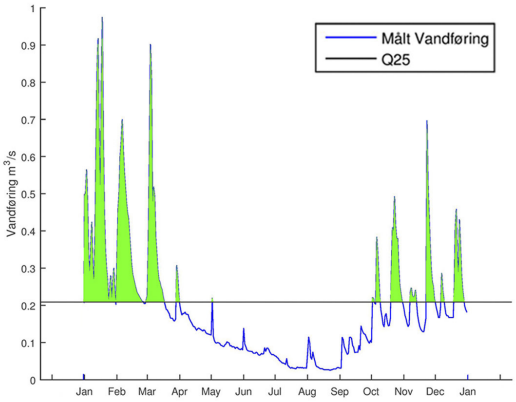
Tabel 8.1. Klasser af slyngniningsgrad anvendt i den nye model til bestemmelse af indvindingstilladelser. [Grøber et al., 2014]

En gennemgang af de forskellige vandløbsparametre, sammen med en gannemgang af hvordan disse er beregnet kan læses i det følgende. Forklarende figurer er udsnit hvor kun et enkelt år er repræsenteret. Hydrologiske faktorer er beregnet på baggrund af hele data sættet.

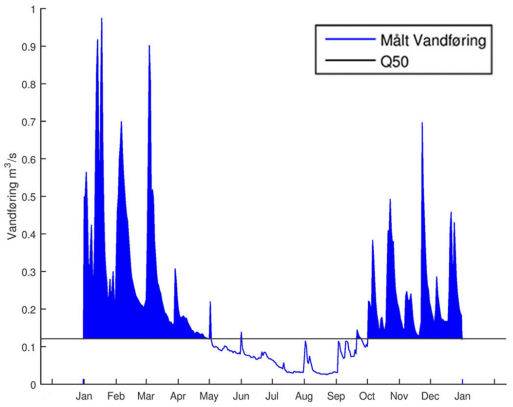
Fre$_{75}$ - Antallet af årlige hændelser med vandføringer under 75 procent persentilen. Vandløb med stabile vandføringsforhold vil have færre hændelser end vandløb med ustabile vandføringsforhold. Fre$_{75}$ angiver tendens til lave vandføringer. Hændelser markeret med rød på figuren th. angiver Fre$_{75}$ hændelser. Det ses at der det pågældende år er to hændelser. Fre$_{75}$ indgår negativt i beregningen af det økologiske indeks, altså medfører få hændelser højere kvalitet.



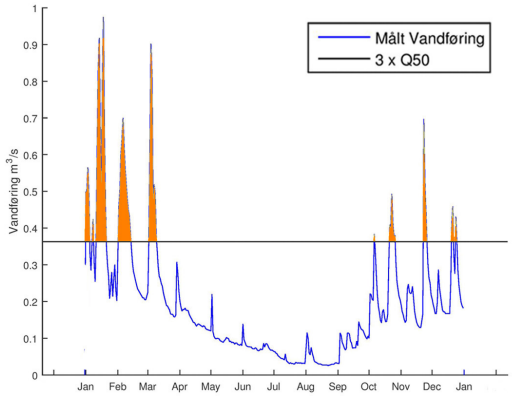
Fre$_{25}$ - Antallet af årlige hændelser med vandføringer over 25 procent percentilen. Vandløb med stabile vandføringsforhold vil have færre hændelser end vandløb med ustabile vandføringsforhold. Fre$_{25}$ angiver tendens til høje vandføringer. Hændelser markeret med grøn på figuren th. angiver Fre$_{25}$ hændelser. Det ses at der det pågældende år forekommer 10 hændelser. Fre$_{25}$ indgår positivt i beregningen af det økologiske indeks, altså medfører flere hændelser højere kvalitet.



Fre$_{1}$ - Antallet af årlige hændelser med en vandføring højere end median vandføringen Q$_{50}$. Ved vandløb med stabile vandføringsforhold vil Q$_{50}$ overskrides med et lavere antal hændelser, og det modsatte vil gælde for vandløb med ustabile vandføringsforhold. En månedslang vandføringshændelse over Q$_{50}$, tæller kun som én hændelse. Hændelser markeret med blå på figuren th. angiver Fre$_{1}$ hændelser. Bemærk at der kun forekommer meget få hændelser på trods af store vandførings variationer. Det ses på figuren at der det pågældende år forekommer fire hændelser. Fre$_{1}$ indgår positivt i beregningen af det økologiske indeks, altså medfører flere hændelser højere kvalitet.



Dur$_{3}$ - Angiver varigheden i dage pr. år af vandføringshændelser med vandføring tre gange højere end Q$_{50}$. Denne parameter angiver altså tendens til ekstreme vandføringer. Hvis middelvandføringen én dag har været over tre gange Q$_{50}$, tæller denne som én dag, hændelser der ikke medfører at middelvandføringen en enkelt dag bliver over tre gange Q$_{50}$, medregnes altså ikke. Hændelser markeret med orange på figuren th. angiver hændelser der indgår i beregningen af Dur$_{3}$. Dur$_{3}$ indgår negativt i beregningen af det økologiske indeks, altså medfører få hændelser højere kvalitet.



Q_{90}/Q_{50} - Vandføring ved 90 percentilen divideret med median vandføringen Q_{50}. En Q_{90}/Q_{50} værdi tæt på 0 indikerer at lave vandføringer er meget ekstreme, hvor en værdi tæt på 1 indikerer det modsatte. Q_{90} er stærkt positivt korreleret til årsminimumsvandføringen. Denne faktor skal bestemmes på baggrund af hele datasættet.

BFI - Baseflow-indekset er vandføringen ved baseflow divideret med den samlede vandføring. Er værdien for baseflowindekset i nærheden af 1 vil vandløbet i høj grad være grundvandsfødt hvorimod det modsatte er tilfældet ved en BFI nær 0. Udregningen af baseflow er beskrevet i afsnit 4.1.1.

Disse seks parametre anvendes i tre modeller, der beskriver det økologiske indeks i et givent vandløb. De tre modeller er lineære regressionsmodeller af samme type som dem der er udført i kapitel 7, blot med brug af forskellige vandløbsparametre, frem for forskellige pejleserier. Alle parametrene er beregnet på baggrund af en hel vandføringstidsserie, resultatet er derefter midlet over antallet af år som vandføringsserien omfatter. De tre modeller ser ud som i det følgende.

Makrofytter DVPI (Planter) model 8.1.

$$DVPI_{EQR} = 0,546 + 0,020 \cdot Fre_{25} - 0,019 \cdot Dur_3 - 0,025 \cdot Fre_{75} \tag{8.1}$$

Modellen for planter indeholder tre hydrologiske variable, og er baseret på data fra 91 lokaliteter hvor den sammenlignet med målte data præsterer en $R^2 = 0,34$.

Makroinvertebrater DVFI (Smådyr) model 8.2.

$$DVFI_{EQR} = 0,217 + 0,103 \cdot Sin + 0,020 \cdot \frac{Q_{90}}{Q_{50}} \cdot Fre_1 \tag{8.2}$$

Modellen for smådyr inkluderer tre fysiske/hydrologiske variable og er baseret på data fra 122 vandløbslokaliteter. Modellen præsterer en R^2 på 0,44 sammenlignet med målte data.

Fisk DFFVa model 8.3.

$$DFFVa_{EQR} = -0,319 + 0,811 \cdot BFI + 0,058 \cdot Sin + 0,050 \cdot Fre_{25} - 0,0413 \cdot Fre_{75} \tag{8.3}$$

Modellen for fisk inkluderer fire fysiske/hydrologiske variable og er baseret på data fra 61 lokaliteter. Modellen præsterer en R^2 på 0,49 hvilket altså er det bedste resultat der er opnået med disse modeller. [Grøber et al., 2014]

8.1.1 Bestemmelse af økologisk indeks

Ved brug af de ovenstående modeller, er det økologiske indeks for Romdrup Å beregnet. Parametrene i tabel 8.2 er anvendt til modellen, resultatet ses i tabel 8.3 grænseværdier kan aflæses i tabel 8.4.

Parameter	Beregnet værdi
Sin	3
Q_{90}	0,057 m^3/s
Q_{50}	0,181 m^3/s
Fre_1	7,93
Fre_{25}	8,68
Fre_{75}	4,53
Dur_3	40 dage

Tabel 8.2. Beregnede vandføringsvariable for Romdrup Å.

Økologisk indeks	Beregnet værdi	Tilstand
$DVPI_{EQR}$	-0,15	Uden for kategori
$DVFI_{EQR}$	0,58	Moderat
$DFFVa_{EQR}$	0,62	Moderat

Tabel 8.3. Beregnede økologiske indekser for Romdrup Å.

Tilstand	DVPI	DVFI	DFFVa
Høj	$>$ 0,70	$>$ 1,00	$>$ 0,94
God	0,50-0,70	0,71-1,00	0,72-0,94
Moderat	0,35-0,50	0,57-0,71	0,40-0,72
Ringe	0,20-0,35	0,43-0,57	0,11-0,40
Dårlig	$<$ 0,20	$<$ 0,43	$<$ 0,11

Tabel 8.4. Grænseværdier for økologiske indekser iht. GEUS [2014].

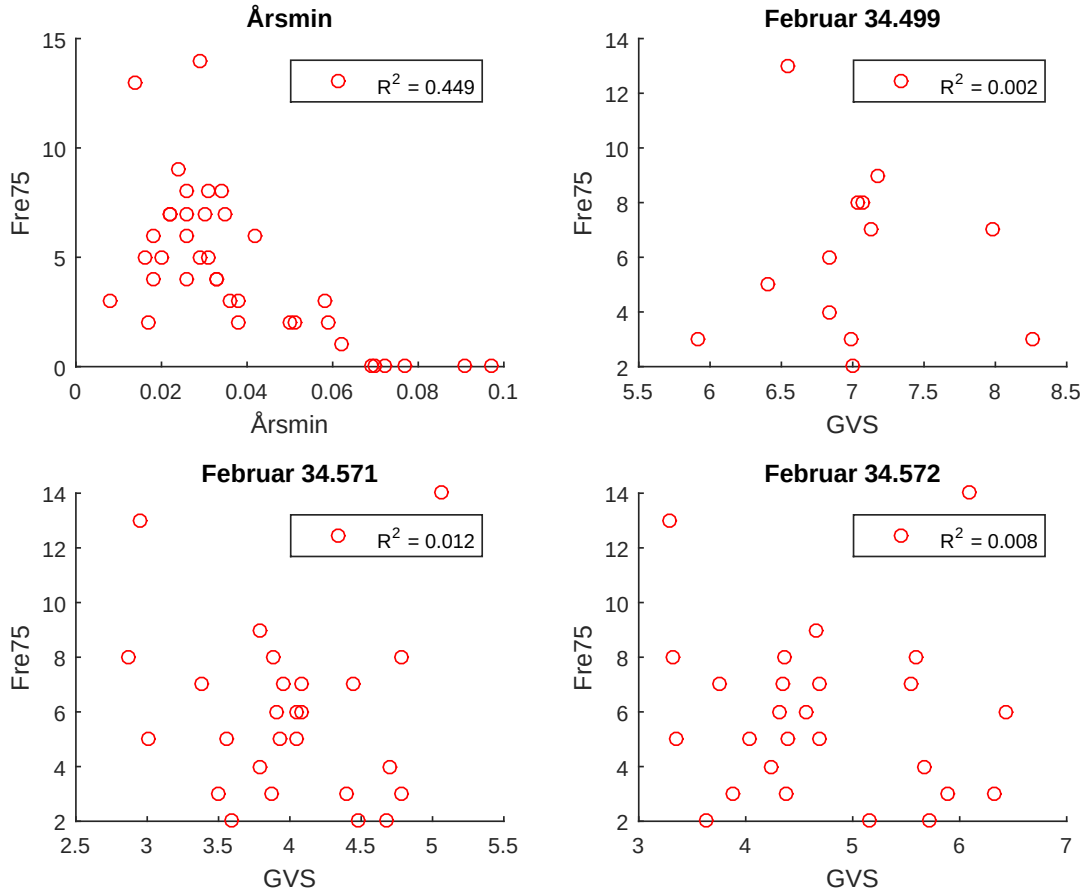
Det kan aflæses i ovenstående tabeller at det økologiske indeks for smådyr og fisk indikerer moderat kvalitet. Det er bemærkelsesværdigt, at det økologiske indeks for planter er langt uden for skala. Dette skyldes at Fre_{75} vægter højere end Fre_{25} i modellen, samt at Dur_3 med 40 dage har en stor negativ påvirkning på modellen. I denne forbindelse skal det noteres at det er uklart, om Dur_3 er beregnet korrekt, idet fremgangsmåden beskrevet i Grøber et al. [2014] er meget uklar.

8.2 Parameteranalyse

I det følgende er hver parameter analyseret, og i den forbindelse korreleret med pejleserier fra prædiktionsmodellen og årsminimumsvandføringen. Parameteren er korreleret med pejleserier, idet grundvandspotentiale er det eneste der påvirkes ved indvinding. Hvis der ikke findes en sammenhæng mellem grundvandspotentiale og parameter, kan det vurderes at denne ikke påvirkes af vandindvinding. Parameteren er korreleret med årsminimumsvandføringen, idet en kobling mellem parameteren og årsminimumsvandføringen vil forsimple udfærdigelsen af en prædiktionsmodel til vandplan 2 metoden.

8.2.1 Fre_{75}

I det følgende undersøges det om Fre_{75}, har en sammenhæng med årsminimumsafstrømningen, og grundvandspotentialet. Disse undersøgelser fremgår af figur 8.1. Fre_{75} beskriver hyppigheden af de lave vandføringshændelser.



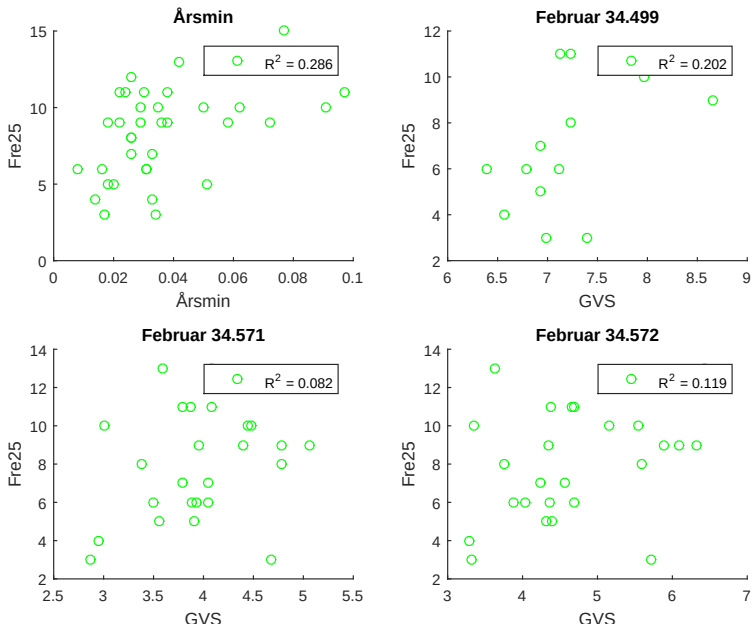
Figur 8.1. Undersøgelse af sammenhængen mellem Fre75 og årsminimumsvandføringen og grundvandspotentialet, for Romdrup Å, med de udvalgte boringer fra prædiktionsmodellen.

Som det fremgår af figur 8.1, er der en negativ sammenhæng mellem årsminimumsvandføringerne og Fre_{75}. Dvs. at ved en høj årsminimumsvandføring bliver hyppigheden af lave vandføringer mindre, hvilket også er forventelig. Der ses ingen sammenhæng mellem Fre_{75} og grundvandspotentialet for de forskellige boringer i Romdrup Å.

8.2.2 Fre_{25}

Muligheden for at kunne prædiktere Fre_{25} på baggrund af pejledata er undersøgt, resultater kan ses på figur 8.2.

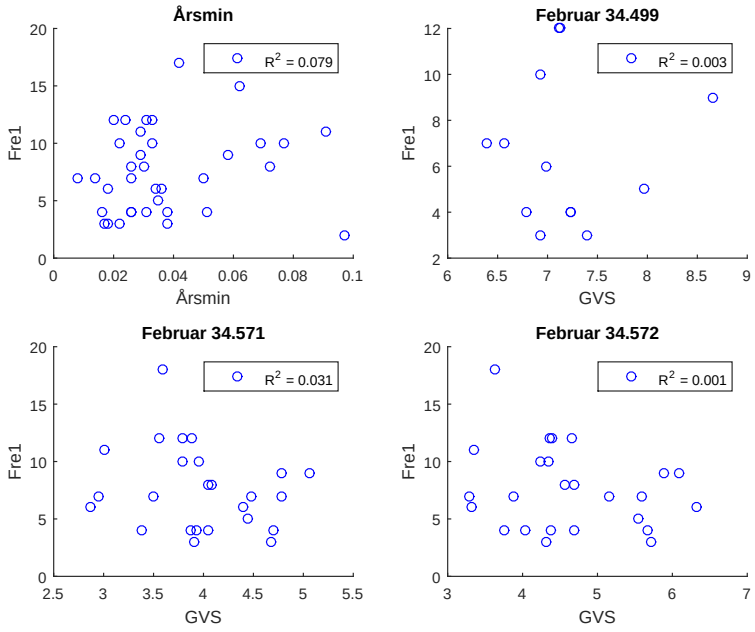
Der er en korrelation mellem årsminimumsvandføringer og Fre_{25}, ved høje årsminimumsvandføringer stiger hyppigheden af høje vandføringer, hvilket er forvendtlig. Men denne korrelation er meget svag, og den vil bidrage med stor usikkerhed til en prædiktionsmodel. Korrelationen mellem Fre_{25} og grundvandspotentialet er meget variende mellem de tre boringer, derfor vurderes det, at det er for tilfældigt ift. at kunne inddrage denne parameter i en prædiktionsmodel.



Figur 8.2. Undersøgelse af sammenhængen mellem Fre_{25} og årsminimumsvandføringen og grundvandspotentialet, for Romdrup Å, med de udvalgte boringer fra prædiktionsmodellen.

8.2.3 Fre_1

Muligheden for at kunne prædiktere Fre_1 på baggrund af pejledata er undersøgt, resultater kan ses på figur 8.3.

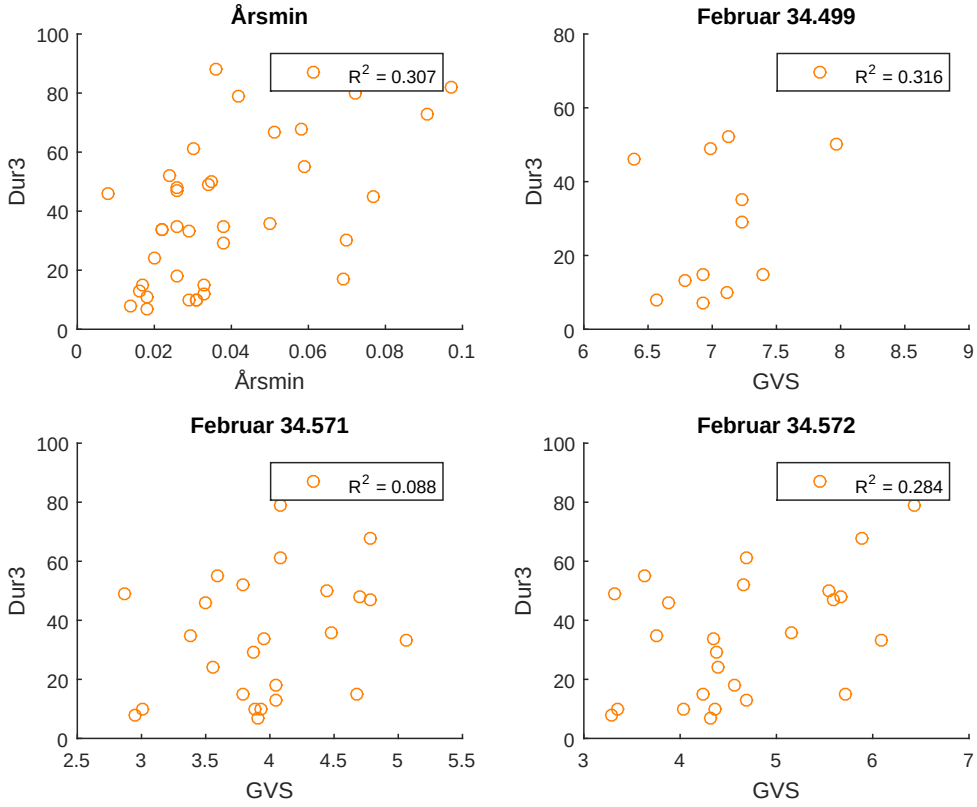


Figur 8.3. Undersøgelse af sammenhængen mellem Fre_1 og årsminimumsvandføringen og grundvandspotentialet, for Romdrup Å, med de udvalgte boringer fra prædiktionsmodellen.

Der ses hverken en sammenhæng mellem Fre_1 og årsminimumsvandføringen eller mellem Fre_1 og grunvandspotentiale for de tre boringer.

8.2.4 Dur_3

Muligheden for at kunne prædiktere Dur_3 på baggrund af pejledata er undersøgt, resultater kan ses på figur 8.4. Der ses en svag sammenhæng mellem Dur_3 og pejleserierne, dog ikke i en grad så det vurderes sikkert at udarbejde en prædiktionsmodel på baggrund af pejledata.

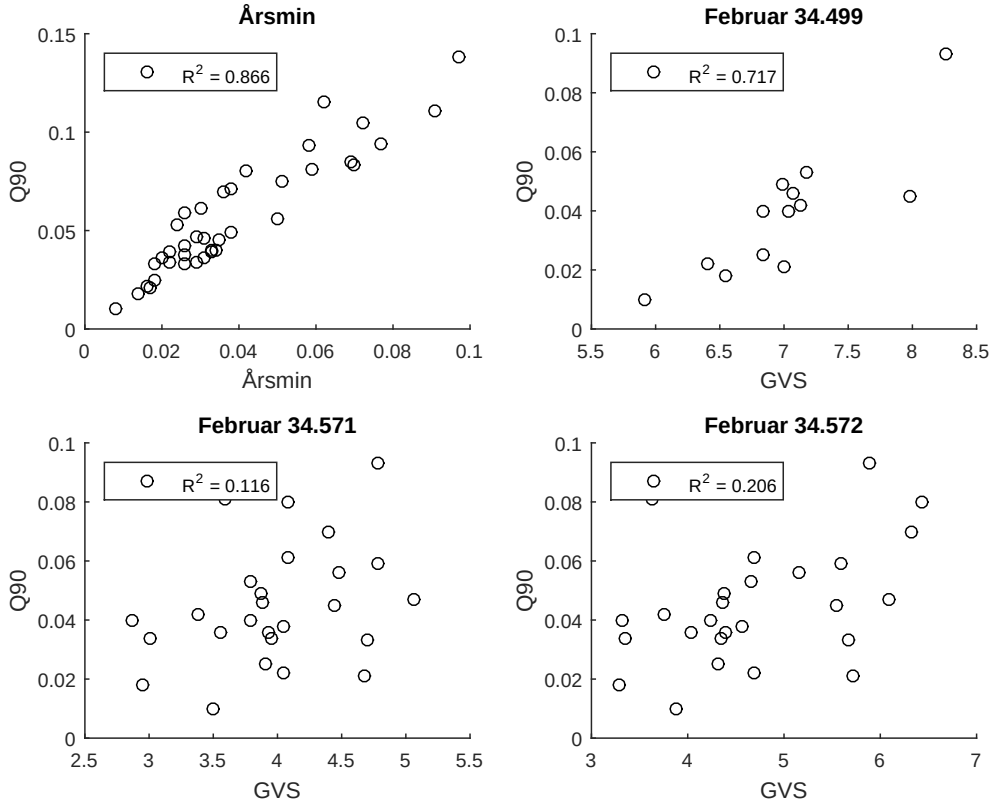


Figur 8.4. Undersøgelse af sammenhængen mellem Dur3 og årsminimumsvandføringen og grundvandspotentialet, for Romdrup Å, med de udvalgte boringer fra prædiktionsmodellen.

8.2.5 Q_{90}

Q_{90} er den parameter, i vandplan 2 metoden, der er tættest beslægtet med årsminimumsvandføringen. Det er også denne parameter der har den største forklaringsgrad med en beregnet korrelation på $R^2 = 0{,}89$ se figur 8.5, hvor Q_{90} er korreleret med årsminimumsvandføringen, samt pejleserierne der indgår i prædiktionsmodellen for Romdrup Å.

Q_{90} i vandplan 2 metoden har til formål at repræsentere de laveste vandføringer. Dog indgår den i modellen som normaliseret med Q_{50}, for på den måde at indikere hvor lave de laveste vandføringer er relativt til Q_{50}. Det kan ses på figur 8.5, at Q_{90} er kraftigt korreleret med årsminimumsvandføringen, og pejleserien fra boring 34.499. Det skal dog bemærkes at korrelationen er meget lav for de øvrige boringer.



Figur 8.5. Undersøgelse af sammenhængen mellem Q_{90} og årsminimumsvandføringen og grundvandspotentialet, for Romdrup Å, med de udvalgte boringer fra prædiktionsmodellen.

Ved undersøgelse af de seks parametre er det kun Q90, som kan beskrives ud fra årsminimumsvandføringerne og grundvandspotentialet. Der er for stor usikkerhed ved at prædiktere de andre parametre. Da det kun er ved parameteren Q90, at der er påvist en sammenhæng med grundvandspotentialet, vurderes det at denne har den største betydning ift. vandindvinding, og dermed også den parameter der vil være mest påvirket af indvinding. Hvis der i stedet for anvendelse af prædikterede værdier, anvendes en middelværdi for de fem restende parametre, og udelukkende udarbejdes en prædiktionsmodel til Q90, vil vandplan 2 metoden ikke medføre en bedre forklaringsevne end den nuværende metode baseret på medianminimumsvandføring. Fordi det ikke er i alle tre EQR modeller at Q90 er repræsenteret, men udelukkende i modellen der estimerer forholdene for mikroinvertebrater, vil denne løsning ikke være ideel.

På baggrund af nærværende undersøgelse, besluttes det at det videre arbejde kun vil fokusere på den nuværende metode til bestemmelse af vandløbspåvirkning.

8.3 Opsamling

- Generelt ses en dårlig forklaringsevne imellem parametrene i vandplan 2 metoden og pejleserier.
- Q_{90} er den eneste parameter det umiddelbart vil give mening at udføre en prædiktionsmodel til, da det kun er ved denne hvor der er påvist en sammenhæng med grundvandspotentialet.

- Da det ikke er i alle tre EQR modeller at Q_{90} er repræsenteret, men udelukkende i modellen der estimerer forholdene for mikroinvertebrater, er en prædiktionsmodel kun til prædiktion af Q_{90}, ikke en ideel løsning.

- Det vurderes at Q_{90} har den største betydning ift. vandindvinding, og dermed også den parameter der vil være mest påvirket af indvinding.

Del II

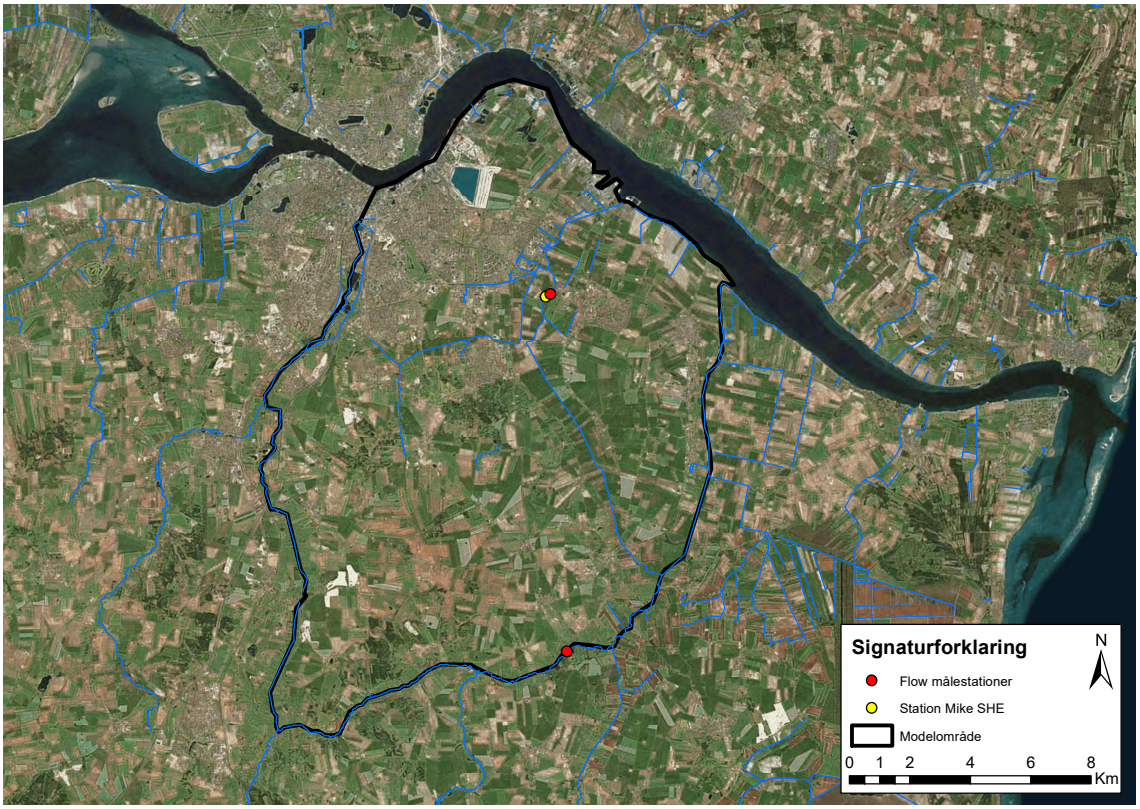
Modellering

I denne del undersøges det, hvor meget kildepladserne i oplandet til Romdrup Å påvirker vandføringen i vandløbet. For at kunne undersøge det fyldestagørende, benyttes en Mike SHE grundvandsmodel til at modellere vandløbspåvirkningen på Romdrup Å. Mike SHE grundvandsmodellen er udleveret af NIRAS. Det undersøges endvidere, hvilke kildepladser der påvirker vandføringen i Romdrup Å, samt hvor meget disse påvirkes. Slutteligt er der udarbejdet en eksponentiel funktion der fittes på påvirkningskurven for hver kildeplads, hvilket tillader en hurtig overslagsberegning af vandløbspåvirkning, uden en modelkørsel er nødvendig.

Mike SHE modellering

9

Dette kapitel omhandler brugen af den grundvandsmodel, udleveret af NIRAS, der benyttes til at bestemme påvirkningen af Romdrup Å, ved indvinding af grundvand. Modellen er en kombineret Mike SHE og Mike 11 model, der er særligt velegnet til at modellere dynamisk. Modellen er i stand til både at beskrive trykhøjder i grundvandsmagasinet samt vandføringer i vandløb. Modelområdet er afgrænset af Østerå i vest og Lindenborg Å i øst, se figur 9.1. Idet Lindenborg Å benyttes som randbetingelse i modellen, er modellen ikke i stand til at modellere vandføringer i Lindenborg Å, men kun tilstrømning fra modelområdet. Derfor fokuseres der i nærværende kapitel på Romdrup Å, hvis opland er omfattet af modelområdet.

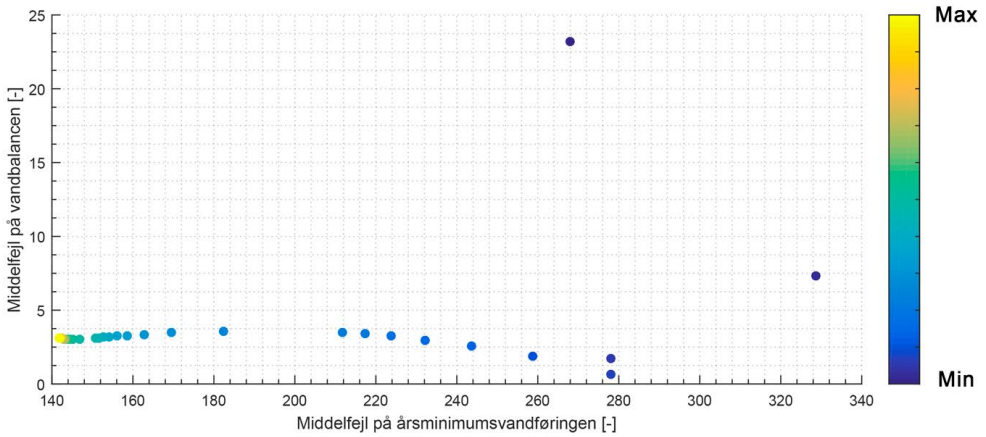


Figur 9.1. Modelområde for Mike SHE modellen. Modellerede vandføringer er udtrukket i omtrent det samme punkt, hvor den fysiske flowmålestation er placeret.

Modellen omfatter både overfladeafstrømning, strømning i umættet- samt mættet zone. I den oprindelige modelopbygning kørte den umættede og den mættede zone sideløbende, men idet denne opbygning resulterede i kraftig støj, der medførte store problemer med at modellere vandføringsændringer, køres den umættede zone separat og er herefter defineret som input til den mættede zone.

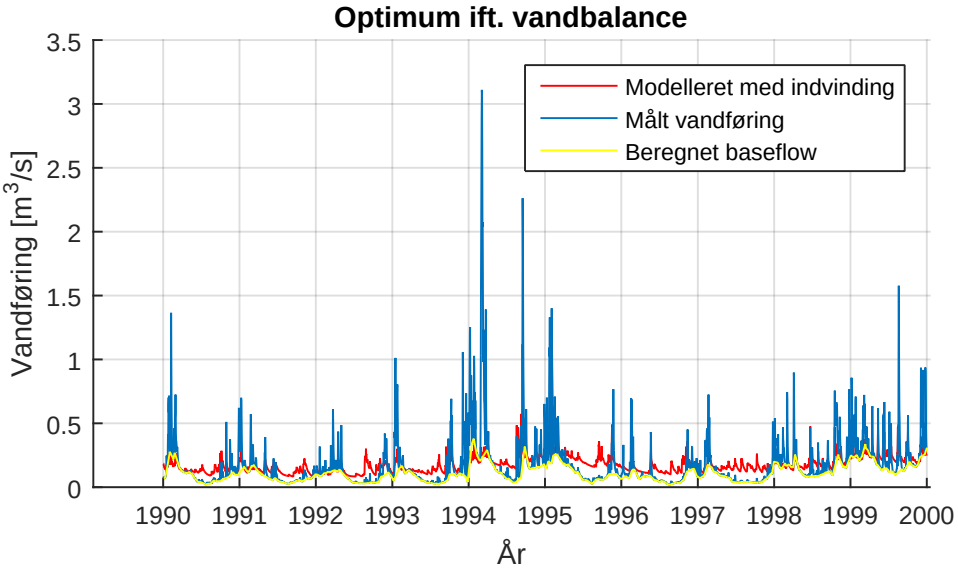
9.1 Valg af dræntidskonstant

Modellen er oprindeligt kalibreret iht. trykhøjder, og formålet med modellen har været at bestemme indvindingsoplande. I nærværende projekt ønskes modellen hovedsageligt anvendt til bestemmelse af vandløbspåvirkning, og det er derfor nødvendigt, inden for realistiske rammer at optimere modellen til dette formål. Der er opstillet to kalibreringskriterier, hvor det ønskes at middelfejlen på vandbalancen og middelfejlen på årsminimumsvandføringen er så lav som muligt. Den eneste parameter der er kalibreret på er dræntidskonstanten. Dræntidskonstanten repræsenterer modstanden for udstrømning af grundvand til vandløb. Der er ændret på dræntidskonstanten inden for intervallet $1 \cdot 10^{-8}$ og $1 \cdot 10^{-2}$. Resultaterne er illustreret ved en Pareto front, som ses på figur 9.2.



Figur 9.2. Alle modelkørsler i intervallet $1 \cdot 10^{-8}$ og $1 \cdot 10^{-2}$ for dræntidskonstanten.

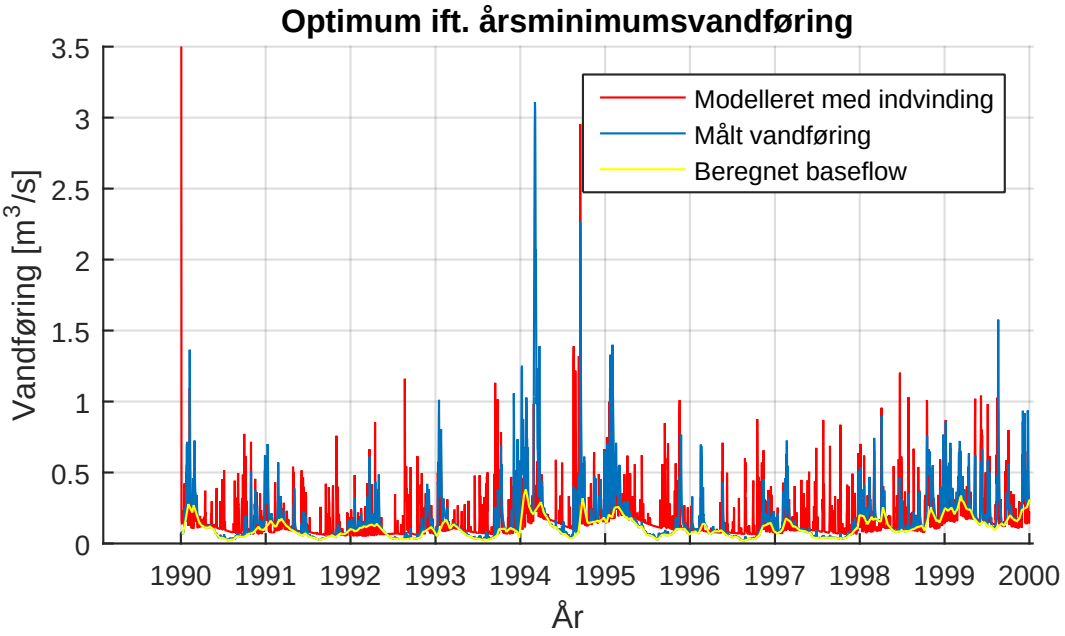
I appendiks A.8 findes en tabel med de eksakte resultater. Ud fra Pareto fronten på figur 9.2, er det ikke umiddelbart muligt at bestemme det bedste kompromis mellem middelfejlen på vandbalancen og middelfejlen på årsminimumsvandføringen. Derfor ses der på den bedste modelkørsel ift. vandbalancen, og det er med en dræntidskonstant på $4 \cdot 10^{-8}$, vandføringstidsserien for denne modelkørsel er vist på figur 9.3.



Figur 9.3. Den optimale dræntidskonstant af alle simulerede dræntidskonstanter ift. vandbalancen, bestemmes til $4 \cdot 10^{-8}$.

Som det kan ses på figur 9.3 kan modellen ikke beskrive de høje vandføringer, og generelt ligger den modellerede vandføring over den observerede.

Den bedste af modelkørslerne for årsminimumsvandføringen er med en drændtidskonstant på $1 \cdot 10^{-2}$, dette er en urealistisk høj drændtidskonstant, og reelt repræsenterer den ingen modstand for udstrømning af grundvand til vandløbet. Ved drændtidskonstanter der er så høje som disse, vil der kun være en minimal forskel ved yderligere forøgning af drændtidskonstanten. Modelkørslen med en drændtidskonstant på $1 \cdot 10^{-2}$ kan se på figur 9.4.

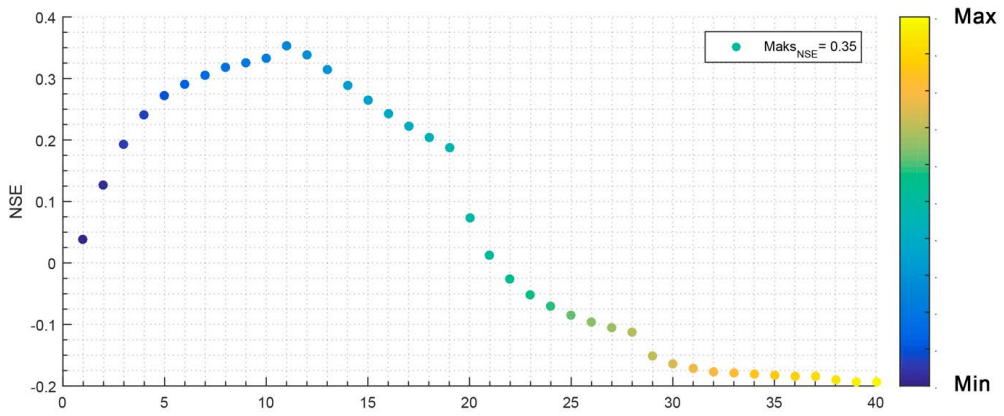


Figur 9.4. Den optimale drændtidskonstant af alle simulerede drændtidskonstanter ift. årsminimumsvandføringer, bestemmes til $1 \cdot 10^{-2}$.

Ved denne drændtidskonstant er der mange udsving, og den modellerede vandføring er flere gange lavere end den observerede, derfor ligger de lave vandføringer fra denne modelkørsel samlet set nærmere de observerede. Det vurderes at en mellemting imellem de to model resultater er ønskelig ift. at opfylde modelleringsbehovet for nærværende projekt. For at kunne bestemme den mest optimale drænkonstant, er der beregnet en NSE-værdi (Nash and Sutchliffe Efficiency) for alle modellerne. NSE-værdien bestemmes ud fra formel 9.1.[Refsgaard et al., 2010]

$$R^2 = \frac{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 - \sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \tag{9.1}$$

NSE-værdi er plottet som funktion af drændtidskonstanterne på figur 9.5 for alle modellerne. Optimum på grafen giver den mindste fejl, mellem observerede og simulerede data.



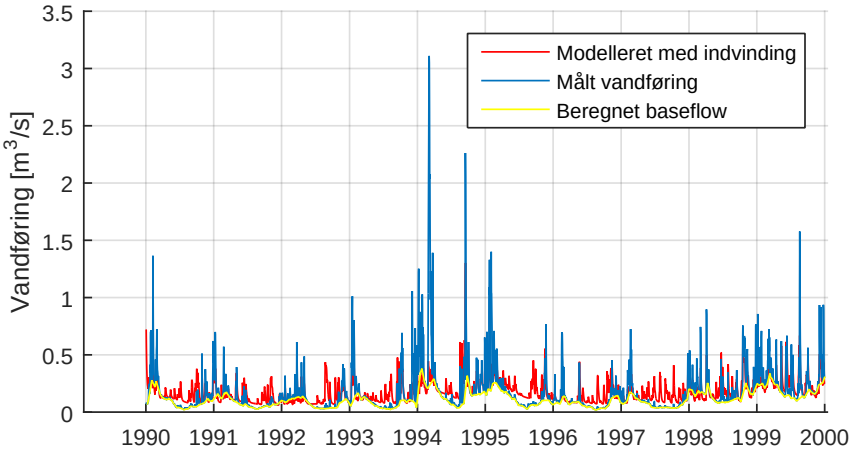
Figur 9.5. De beregnede NSE-værdier for alle modellerne, som funktion af de forskellige drændtidskonstanter.

I tabel 9.1 kan der aflæses, hvilken drændtidskonstant der er kørt med ved de forskellige modeller.

Nr.	d	Nr.	d	Nr.	d	Nr.	d	Nr.	d
1	$1\ 10^{-8}$	10	$1\ 10^{-7}$	19	$1\ 10^{-6}$	28	$1\ 10^{-5}$	37	$1\ 10^{-4}$
2	$2\ 10^{-8}$	11	$2\ 10^{-7}$	20	$2\ 10^{-6}$	29	$2\ 10^{-5}$	38	$2\ 10^{-4}$
3	$3\ 10^{-8}$	12	$3\ 10^{-7}$	21	$3\ 10^{-6}$	30	$3\ 10^{-5}$	39	$1\ 10^{-3}$
4	$4\ 10^{-8}$	13	$4\ 10^{-7}$	22	$4\ 10^{-6}$	31	$4\ 10^{-5}$	40	$1\ 10^{-2}$
5	$5\ 10^{-8}$	14	$5\ 10^{-7}$	23	$5\ 10^{-6}$	32	$5\ 10^{-5}$		
6	$6\ 10^{-8}$	15	$6\ 10^{-7}$	24	$6\ 10^{-6}$	33	$6\ 10^{-5}$		
7	$7\ 10^{-8}$	16	$7\ 10^{-7}$	25	$7\ 10^{-6}$	34	$7\ 10^{-5}$		
8	$8\ 10^{-8}$	17	$8\ 10^{-7}$	26	$8\ 10^{-6}$	35	$8\ 10^{-5}$		
9	$9\ 10^{-8}$	18	$9\ 10^{-7}$	27	$9\ 10^{-6}$	36	$9\ 10^{-5}$		

Tabel 9.1. Hvor d er drændtidskonstanten og Nr. er den modelkørsel som er angivet i figur 9.5. Der kan aflæses hvilke drændtidskonstanter der hører til de forskellige modeller.

Det fremgår af figur 9.5, at det er ved modelkørsel 11, hvor optimum ligger. Ud fra dette aflæses drændtidskonstanten i tabel 9.1 til $2\ 10^{-7}$. Den modellerede tidsserie for vandføringen ved denne drændtidskonstant er vist på figur 9.6.



Figur 9.6. En drændtidskonstant på $2 \cdot 10^{-7}$, vurderes at være det bedste kompromis. Denne model er både i stand til at beskrive årsminimumsvandføringer og vandbalancen med tilstrækkelig nøjagtighed.

Den modellerede årsminimumsvandføring er stadig højere end den observerede årsminimumsvandføring, dog er der ikke så mange fluktuationer, og det vurderes derfor at denne modelkørsel tangerer de observerede vandføringer bedst. Generelt opnås der ikke et perfekt fit, og der forefindes stadig nogle uønskede fluktuationer i den modellerede vandføring, dog vurderes modellen at være i stand til at modellere vandløbspåvirkning. For at opnå mere realistiske resultater vil det være nødvendigt med en komplet rekalibrering, eller udfærdigelse af en helt ny model. Dette er tidskrævende og ikke realistisk inden for projektets tidsramme.

9.2 Opsamling

- Modellens oprindelige formål er, at kunne bestemme indvindingsoplande, og denne model er derfor kalibreret op imod trykniveauer.
- Modellens formål i nærværende rapport er, at kunne bestemme vandføringer, men idet modellen ikke er kalibreret efter vandføringer, ses en stor afvigelse.
- Det er påvist i dette afsnit, at der ved ændring af dræntidskonstanten stadigvæk er en stor afvigelse mellem de observerede og de modellerede vandføringer.

Bestemmelse af responstiden ift. kildepladsers påvirkning af vandløb

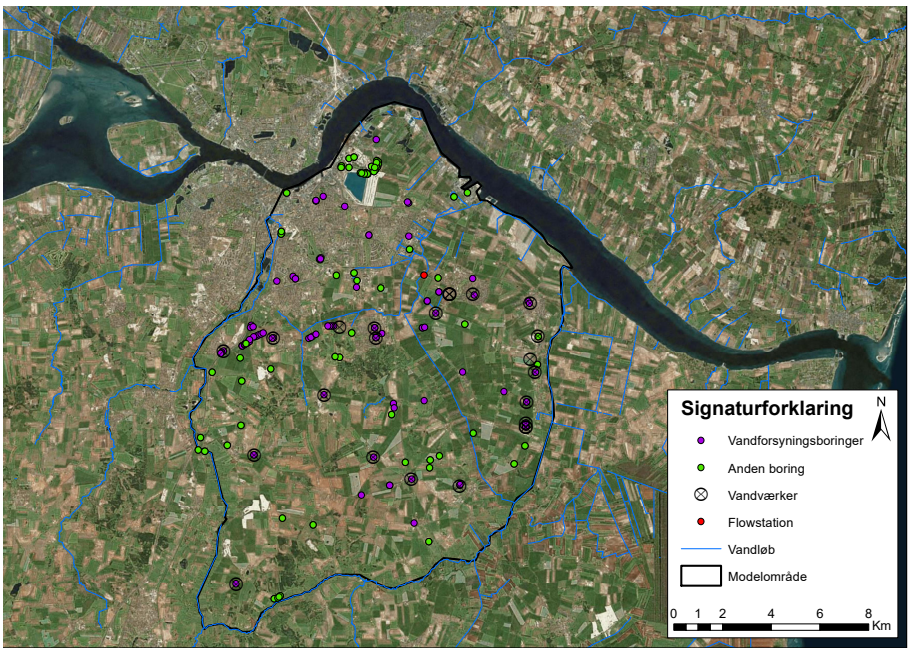
10

I dette kapitel undersøges responstiden ift. relevante kildepladsers påvirkning af vandløb i modelområdet, dvs. hvor lang tid der går fra en indvinding ændres, til denne ændring kan registreres på vandføringen i vandløb. Modelområdet screenes for kildepladser, og det undersøges hvilke kildepladser der har den største påvirkning på vandløbene. Herefter undersøges responstiden for hver af de relevante kildepladser.

Det ønskes ungersøgt, ved hvilke kildepladser en indvinding vil nå at slå igennem til et vandløb inden for prædiktionsperioden. De faktorer som har betydning for vandløbpåvirkningen i forbindelse med indvinding, er geologien i området og afstanden mellem kildeplads og vandløb, se afsnit 3.1.

10.1 Screening for kildepladser i modelområdet

På figur 10.1, ses de boringer der indgår i modelområdet. Anvendelsen af hver enkelt boring, er undersøgt i Jupiter Databasen, og på figur 10.1 er boringerne delt op i to kategorier; vandforsyningsboringer og boringer med anden anvendelse.



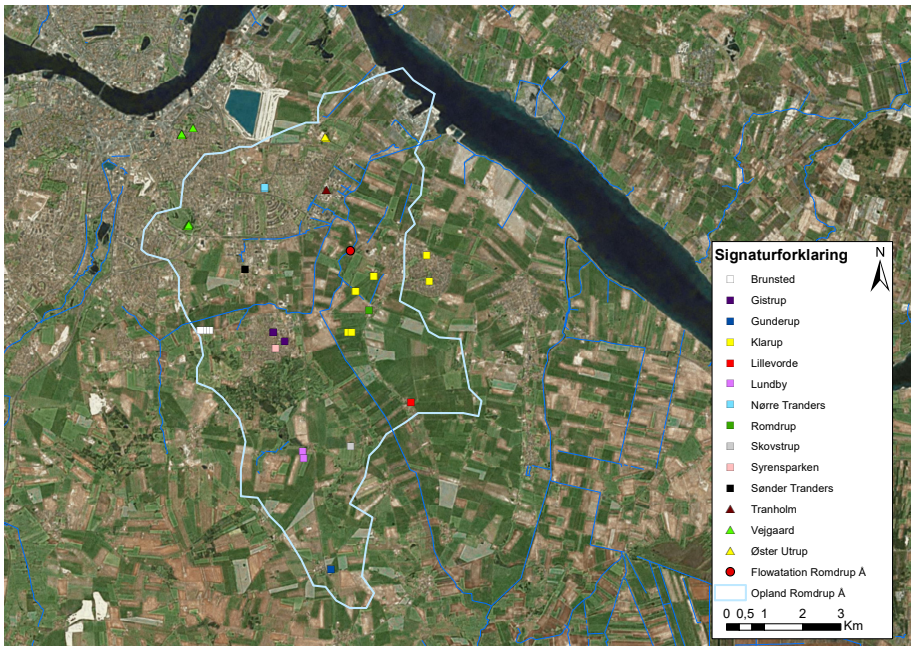
Figur 10.1. Indvindingsboringer inden for modelområdet.

Det fremgår af figur 10.1, at der er rigtig mange boringer som anvendes til vandforsyning. I det følgende undersøges det, hvilken påvirkning hver enkelt kildeplads har på vandløbene

i modelområdet. For ikke at skulle opstille scenarier, for alle kildepladser i modelområdet til hvert vandløb, afgrænses sceeningen til kun at omfatte de kildepladser som ligger i det topografiske opland til vandløbet. Det er altså muligt, at der findes kildepladser uden for det topografiske opland der også påvirker vandføringen, se kapitel 3.1.

10.2 Romdrup Å

På figur 10.2 er det topografiske opland til Romdrup Å indtegnet, sammen med 14 kildepladser der har tilknyttede indvindingsboringer i oplandet. Enkelte kildepladser har også tilknyttede boringer uden for det topografiske opland til Romdrup Å.



Figur 10.2. Kildepladser inden for oplandet til Romdrup Å.

Der opstilles et scenarie for hver kildeplads uafhængigt af hvor mange indvindingsboringer der er tilknyttet, kildepladser samt perioden hvor fra der findes indvindingsdata, er oplistet i tabel 10.1.

Kildeplads	**Periode for indvindingsdata**
Brunsted	1988-2016
Gistrup	1989-2016
Gunderup	1988-2016
Klarup	1988-2016
Lillevorde	1988-2006
Lundby	1988-2006
Nørre Tranders	1988-1994
Romdrup	1988-2015
Skovstrup	1991-2004
Syrensparken	1988-2008
Sønder Tranders	1988
Tranholm	1988-2016
Øster Uttrup	1988-2008
Vejgaard (Golfparken)	2013-2016

Tabel 10.1. Kildepladser der befinder sig i det topografiske oplande til Romdrup Å, med tilhørende periode for indvindingsdata.

I Lundby Krat er der, på nuværende tidspunkt, en kildeplads under opførelse, og den forventes klar til åbning i 2017. Kildepladsen skal fra fire indvindingsboringer levere 1.000.000 m^3 vand om året. [Aalborg Forsyning, 2015] Da det er af interesse at undersøge påvirkningen fra denne kildeplads på vandføringen i Romdrup Å, medtages denne også i analysen.

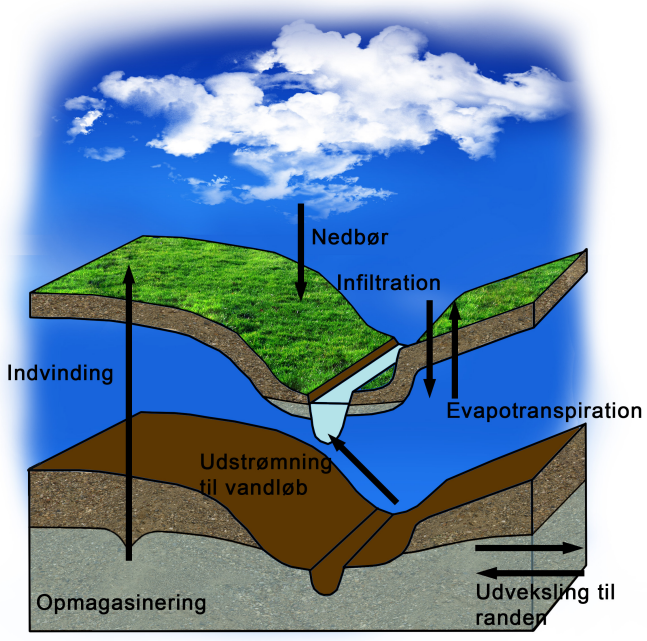
10.2.1 Analyse af kildepladsers vandløbspåvirkning

I dette afsnit undersøges vandbalancen efter ét år ved indvinding fra hver kildeplads. Endvidere undersøges det hvor hurtigt en indvinding slår igennem på vandføringen i Romdrup Å, for at finde ud af hvilke kildepladser der påvirker vandføringen inden for prædiktionsperioden.

De forskellige scenarier modelleres individuelt, dvs. at der kun indvindes fra én kildeplads ad gangen. Mike SHE modellen omfatter perioden fra 1990-2013. Derfor kan kildepladsen til Sønder Tranders vandværk og Vejgaard vandværk (Golfparken) ekskluderes fra analysen, da der ikke har været indvinding i modelperioden.

For at undersøge hver enkelt kildeplads påvirkning af vandbalancen i oplandet til Romdrup Å, modelleres påvirkningen fra hver kildeplads individuelt med en indvinding på 1.000.000 m^3/år. I analysen indvindes med en konstant indvinding i alle scenarierne, da det herudfra er nemmest at sammenligne påvirkningen fra hver kildeplads.

For at undersøge hvor stor kildepladsernes påvirkning er på vandføringen i Romdrup Å efter ét års indvinding, er der udtrukket en vandbalance fra Mike SHE modellen for hvert scenarie. Elementerne der indgår i vandbalancen er skitseret på figur 10.3.



Figur 10.3. Eksempel på en vandbalance i et grundvandsmagasin. Vand falder på overfladen som nedbør, og noget af det infiltrerer til det underliggende grundvandsmagasin. Noget af vandet pumpes op fra en indvindingsboring, og andet udveksles mellem enten et vandløb eller oplandets rand.

Hvert scenarie sammenholdes med et scenarie uden indvinding, for at undersøge hvor i vandbalancen vandet til indvindingen tages fra. Resultatet af vandbalanceundersøgelsen kan ses i tabel 10.2, og er opgivet i procent. Da indflitrationen og fordampningen ikke ændre sig, er disse to ikke inkluderet i tabellen.

Kildeplads	**Indvinding** [%]	**Opmagasinering** [%]	**Vandløb** [%]	**Udveksling til randen** [%]
Brunsted	100	29	32	39
Gistrup	100	36	54	10
Gunnerup	3	93	0	7
Lillevorde	100	12	33	55
Lundby	50	76	4	19
Lundby Krat	100	44	51	5
Klarup	75	16	73	11
Nr. Tranders	100	67	19	14
Romdrup	100	14	59	28
Skovstrup	12	87	10	2
Syrensparken	100	47	42	11
Tranholm	100	30	58	12
Øster Uttrup	100	50	21	29

Tabel 10.2. Vandbalance for det første år efter påbegyndt indvinding. Tabellen indeholder de kildepladser der påvirker Romdrup Å. Indvinding; omfatter den procentdel af indvindingen fra kildepladsen, der forekommer i oplandet til Romdrup Å. Enkelte vandværker indvinder vand fra flere oplande, og påvirker derfor ikke kun oplandet til Romdrup Å. Opmagasinering; omfatter den del af indvindingen der kun har nået at slå igennem på grundvandsmagasinets opmagasinering efter det første år. Vandløb; omfatter den del af indvindingen der påvirker vandføringen i vandløbet efter det første år. Udveksling til randen; omfatter den del der strømmer ind eller ud af oplandet til Romdrup Å, til andre vandløb eller til andre oplande. Kolonne 2-4 giver tilsammen 100 % ved hver kildeplads.

Ud fra tabel 10.2 kan påvirkningen på vandløb vurderes. Ud for kolonnen "Indvinding", kan det aflæses hvor stor en procentdel af de 1.000.000 m^3/år der indvindes i oplandet. Hvis ikke denne værdi er 100 %, kan det skyldes at kildepladsen også påvirker andre oplande, eller at indvindingsboringen i modellen ikke har kapacitet til at indvinde 1.000.000 m^3/år. Kolonnen "Opmagasinering", angiver hvor stor en procentdel af indvindingen der efter et år har påvirket opmagasineringen i grundvandsmagasinet. Kolonnen "Vandløb", angiver hvor stor en procentdel af indvindingen der efter et år har nået at slå igennem på vandføringen i vandløb og kolonnen "Udveksling til randen", angiver hvor stor en procentdel af indvindingen der efter et år, påvirker udvekslingen mellem dette opland og nabo oplande.

I tabel 10.2 ses det, at det ikke er alle kildepladser der henter alt vand fra det topografiske opland til Romdrup Å. F.eks. har kildepladsen til Klarup vandværk enkelte boringer uden for det topografiske opland, se figur 10.2. Andre kildepladser påvirker kun vandbalancen i det topografiske opland meget lidt, heriblandt Gunnerup, Lundby og Skovstrup. Dette skyldes at boringerne i Mike SHE modellen ikke har kapacitet til at indvinde 1.000.000 m^3/år, og indvindingen er derfor begrænset i modellen. Da disse 3 kildepladser ikke har kapacitet nok til at indvinde 1.000.000 m^3/år ekskluderes de fra den videre analyse. Ved de øvrige kildepladser indvindes alt vandet fra oplandet til Romdrup Å. Det vand der indvindes, påvirker både opmagasineringen i oplandet, udstrømning fra oplandet til andre

opland, eller vandføringen i vandløb. Der er stor forskel på hvor meget hver indvindingen er slået igennem efter ét års indvinding. På trods af at kildepladsen i Klarup ikke henter alt vand fra det topografiske opland til Romdrup Å, har denne stadig en påvirkning over 50 % på udstrømningen til vandløb inden for det første år. Kildepladserne i Gistrup, Lundby Krat, Romdrup, Tranholm når også at påvirke udstrømningen til vandløb med mere end 50 % af indvindingen inden for det første år.

Opmagasineringen er i de fleste tilfælde det element der påvirkes mest efter ét års indvinding, dette skyldes at sænkningstragtens udbredelse efter ét års indvinding ikke når at påvirke udstrømningen til vandløb eller rand med fuld styrke. Påvirkningen af opmagasineringen i grundvandsmagasinet optræder kun efter en ny indvinding startes, og indtil sænkningstragten er fuldt udviklet, det betyder at hvis modellen køres over en længere tidshorisont, vil hele påvirkning på et tidspunkt kunne observeres på drænudstrømningen. Se evt. afsnit 3.1.

10.2.2 Simpel model til bestemmelse af vandløbspåvirkning

I dette afsnit undersøges responstiden fra en indvinding startes, og til der kan ses en påvirkning på vandføringen i vandløb. Denne undersøgelse udføres for at undersøge om der er belæg for at variere indvindingerne i oplandet inden for prædikstionshorisonten. Ud fra Mike SHE modelleringen af hver enkelt kildeplads med en konstant indvinding, udarbejdes en simpel model, hvor forskellen i vandføringen med og uden indvinding, fittes til det exponentielle udtryk 10.1. Udtrykket er udformet således at pumpetiden og den totale respons sammen med fittede model parametre, er i stand til at udtrykke vandløbspåvirkningen ved vandindvinding uafhængigt af en grundvandsmodel. Denne metode gør det muligt, at beregne påvirkningen af vandføringen i Romdrup Å ved forskellig indvinding. Metoden tager i øvrigt udgangspunkt i superpositionsprincippet, og flere individuelle påvirkninger kan dermed ligges sammen til én samlet påvirkning.

$$Fit(i) = Respons \cdot \left(1 - b \cdot exp^{\frac{-t_{Pumpe}(i)/100}{a}}\right) \tag{10.1}$$

Hvor

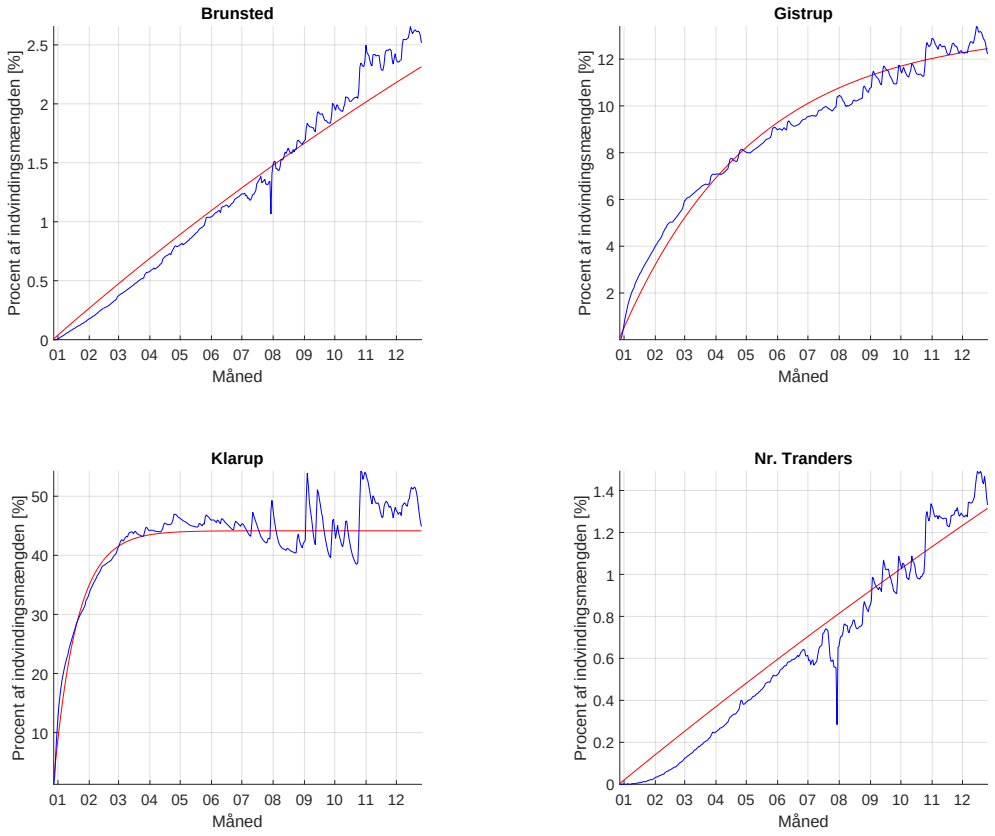
Fit	Modelfittet vandføringsændringer	[m^3/s]
$Respons$	Den maksimale forskel som modellen stabilliserer sig ved	[-]
a	Hældning	[-]
b	Skæring	[-]
t_{Pumpe}	Pumpetid	[s]

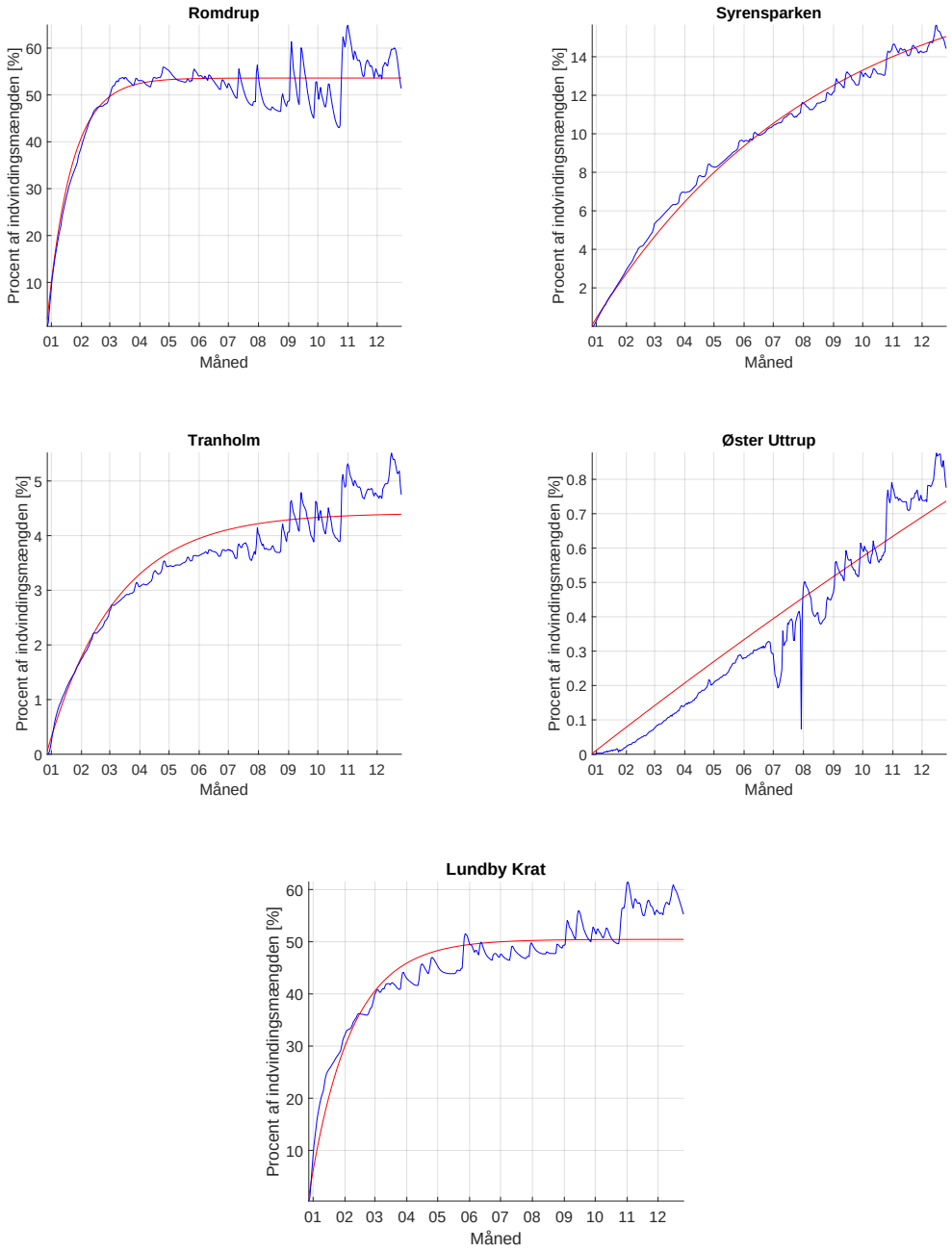
Modellen fittes til samtlige kildepladser, og resultatet heraf benyttes i de følgende analyser, samt i det følgende kapitel. I tabel 10.3 ses alle parametrene til modelfittet for de forskellige vandværker.

Vandværk	Indvinding [m^3/år]	Respons	a	b
Brunsted	1.000.000	$2,5 \cdot 10^{-3}$	10,50	1
Gistrup	1.000.000	$4,2 \cdot 10^{-3}$	1,30	1
Klarup	1.000.000	$1,4 \cdot 10^{-2}$	0,23	1
Lundby Krat	1.000.000	$1,6 \cdot 10^{-2}$	0,40	1
Nr. Tranders	1.000.000	$2,5 \cdot 10^{-3}$	20,00	1
Romdrup	1.000.000	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,25	1
Syrensparken	1.000.000	$6,0 \cdot 10^{-3}$	2,30	1
Tranholm	1.000.000	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,70	1
Øster Uttrup	1.000.000	$1,4 \cdot 10^{-3}$	20,00	1

Tabel 10.3. Parametre til modelfit for alle de udvalgte kildepladser.

Modelfits med parametre fra tabel 10.3 er afbildet i figur 10.4. For at der er potentiale for at implementere variable indvindingstilladelser, er det essentielt at en betydelig påvirkning forekommer inden for det første halve år. Derfor udarbejdes modelfittet kun for et enkelt år. Dette betyder, at den fulde påvirkning ved indvinding fra hver kildeplads ikke kan læses fra figur 10.4, men derimod kun vandløbspåvirkningen efter et år. Modelfittene er tilpasses således at de fitter på det første år, og den efterfølgende vandløbspåvirkning er dermed ikke taget i betragtning. Bemærk at vandføringsdata er udtrukket fra den samme lokation som flowstationen er placeret på, se figur 10.2. Dette betyder at grundvandsudstrømning til Landbækken ikke indgår i den modellerede vandføring, og derfor er procentsatserne ikke de samme som i tabel 10.2. Dette er gjort sådan, da det ønskes at de modellerede vandføringer er sammenlignelige med de observerede vandføringer fra flowstationerne, se afsnit 4.1.





Figur 10.4. Påvirkning af vandføringen i Romdrup Å efter ét års indvinding. Y-aksen indikerer hvor stor en procentdel af indvindingen der er slået igennem på vandføringen i Romdrup Å.

Det er kontrolleret for kildepladsen i Klarup, at modelfittene ikke ændre sig, når indvindingen ændres. Denne analyse er foretaget med forskellige indvindinger, og resulatet af analysen viser, at der ikke er en ændring af modelfittene. Analysen kan læses i appendiks G.

Det beregnes hvor mange dage der går før 25, 50, 75 og 99 %, af den maksimale påvirkning på vandføringen, er opnået. Derfor er der for de ni kildepladser, som er tilbage, kørt en model for en tiårig periode. Resultatet er vist i tabel 10.4.

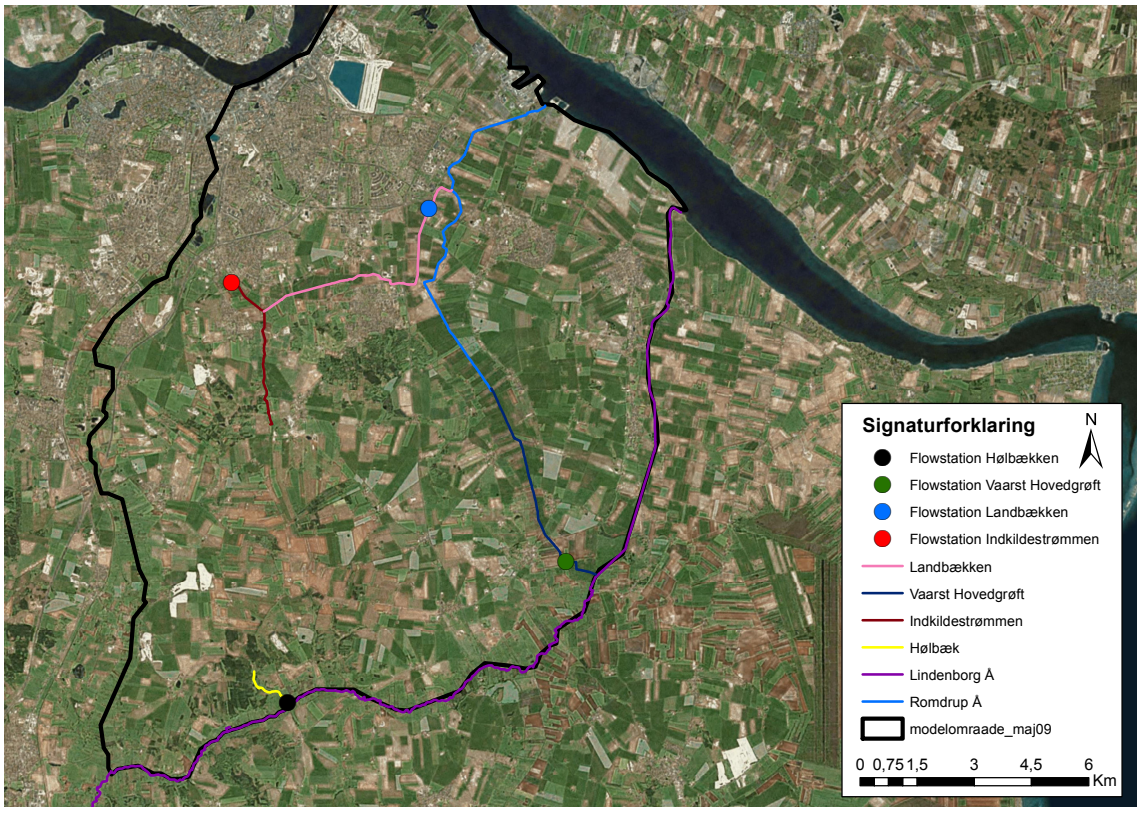
Vandforsyninger	Antallet af dage ved:			
	25%	50%	75%	99%
Brunsted	199	480	958	2924
Gistrup	80	193	387	1288
Klarup	6	16	34	114
Lundby Krat	34	82	165	552
Nørre Tranders	171	414	827	2641
Romdrup	6	16	34	114
Syrensparken	108	262	526	1746
Tranholm	34	82	165	552
Øster Uttrup	128	311	622	2058

Tabel 10.4. Antallet af dage før henholdvis 25, 50, 75 og 99 % af den maksimale vandløbspåvirkning indtræffer.

Jævnfør tabel 10.4, er der kun to kildepladser, (Klarup og Romdrup) ud af de ni, hvor den maksimale påvirkning ses inden for et år. Det kan tage rigtig mange år, i dette tilfælde op til 8 år, før påvirkningen stabiliseres.

10.3 Andre vandløb i model området

Det ønskes undersøgt, om de beskrevne metoder i denne rapport, kan omsættes til øvrige vandløb i modelområdet. På baggrund af en analyse af mindre vandløb i modelområdet, er der udvalgt fire vandløb; Hølbækken, Indkildestrømmen, Landbækken og Vårst Hovedgrøft. Placeringen af disse fire vandløb kan ses sammen med Romdrup Å og Lindenborg Å på figur 10.5.

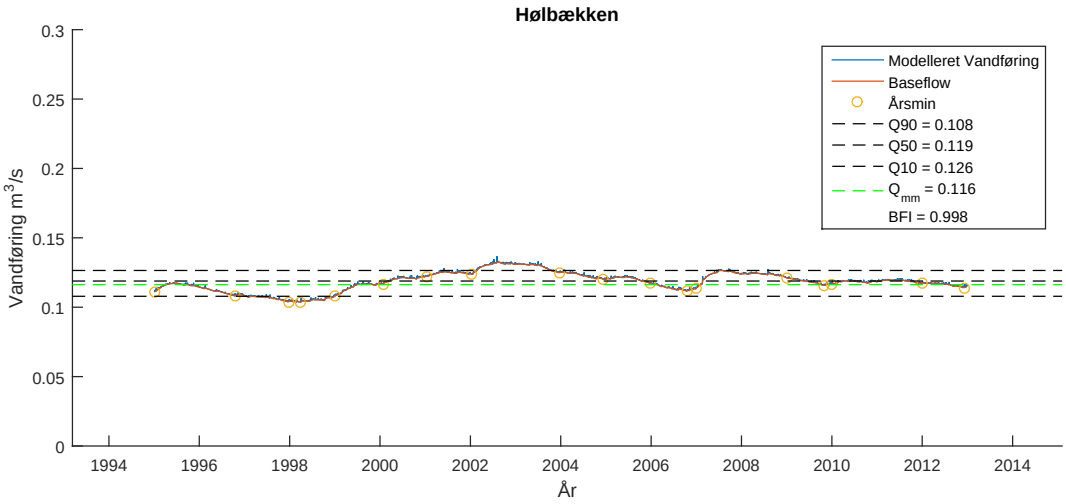


Figur 10.5. Andre vandløb indenfor modelområdet, sammen med de stationer hvor vandføringen er trukket ud fra Mike SHE modellen.

Disse fire vandløb vil i nærværende afsnit blive analyseret nærmere. Der vil blive udført prædiktionsmodeller til de af vandløbene, hvor det er muligt. Ydermere bestemmes indvindingernes påvirkning i hvert vandløbs opland, og responstider heraf analyseres. Idet der ikke findes brugbare vandføringsmålinger for vandløbene, er vandføringerne modelleret i en Mike SHE model, udleveret af NIRAS. Mike SHE modellen omfatter data fra perioden 1990-2013. Før der udtrækkes vandføringsdata for de fire vandløb, køres modellen fem år uden der udtrækkes data, for at sikre at modellen er stabil. De modellerede vandføringstidsserier starter derved i år 1995.

10.3.1 Hølbækken

Hølbækken er et mindre kildefødt vandløb, 1300 meter langt, med udspring ved Volsted Plantage, og med udløb i Lindenborg Å. Hølbækken er særligt interessant, da vandføringen i denne vil blive påvirket af en fremtidig kildeplads i Volsted Plantage, dette kan vise sig, at være særligt problematisk idet vandløbet er B1 klassificeret (gyde- og yngelopvækstvand for laksefisk), og dermed kun må påvirkes i minimal grad. [Aalborg Kommune, 2012] Det er derfor af stor interesse at undersøge, hvordan Hølbækken påvirkes af vandindvinding fra Volsted Plantage. Den modellerede vandføring i Hølbækken fremgår af figur 10.6.

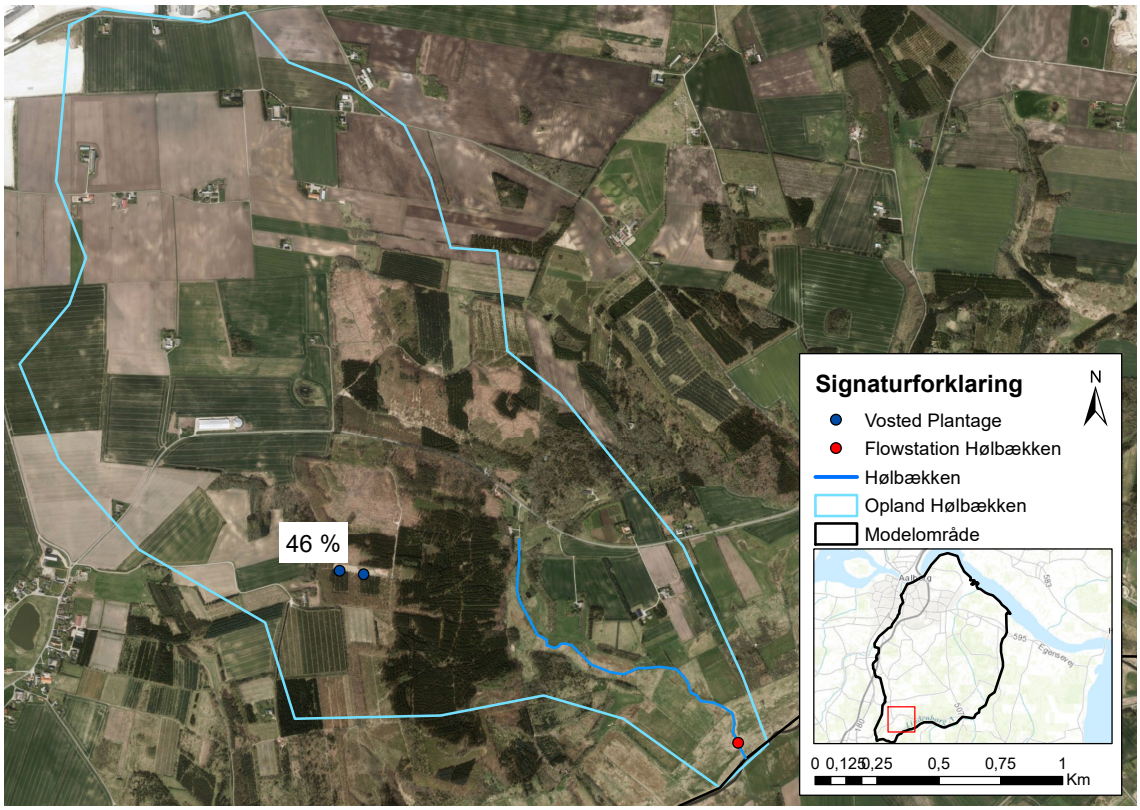


Figur 10.6. Vandføring i Hølbækken.

Det skal understreges, at den modellerede vandføring i Hølbækken ikke kan valideres og derfor ikke kan betragtes som værende af en realistisk størrelse, men det antages, at vandføringsvariationen er realistisk og derfor bruges denne til at vurdere hvornår årsminimumsvandføringer forekommer.

Den modellerede vandføring i Hølbækken har ikke den samme årstidsafhængige vandføringskarakteristik som det kan observeres i Romdrup Å og i Lindenborg Å, se afsnit 4.1.1. Derimod stiger og falder vandføringen løbende igennem en længere årrække, som det ses på figur 10.6. Dette medfører, at flere årsminimumshændelser forekommer lige omkring nytår (januar hvis vandføringen er stigende og december hvis vandføringen er faldende). Det er derfor ikke muligt at udføre en præcis prædiktionsmodel for Hølbækken.

Vandløbets topografiske opland, samt forløb er illustreret på figur 10.7. På baggrund af de modellerede vandføringer er der udarbejde en responskurve for påvirkningen fra kildepladsen i Volsted Plantage, denne kan ses i appendiks H.1

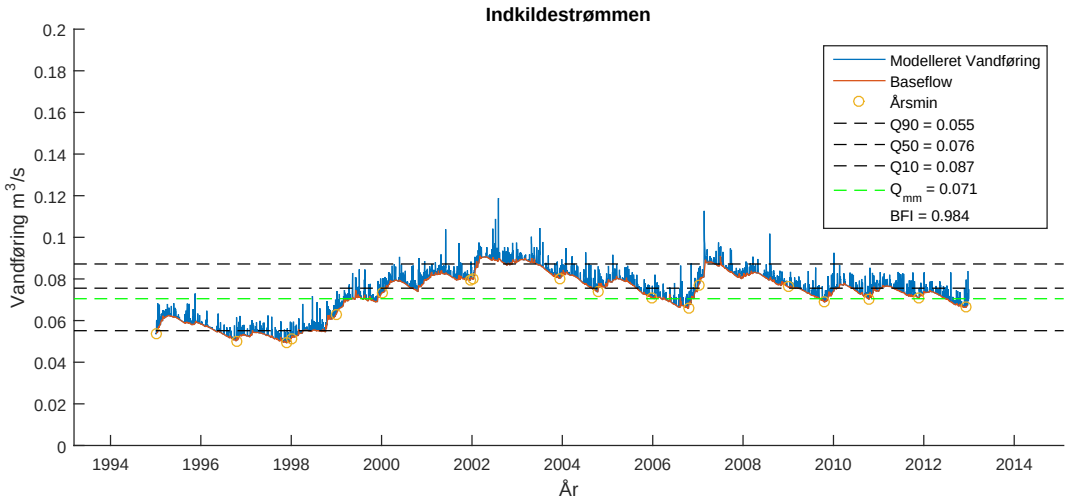


Figur 10.7. Hølbækken med det tilhørende topografiske opland, hvor påvirkningen fra et år fra kildepladsen i Volsted Plantage er vist. Påvirkningen er beregnet på baggrund af modelfittet for Volsted Plantage, se figur 10.7.

Vandløbspåvirkingen fra kildepladsen i Volsted Plantage er modelleret i Mike SHE, og som det kan ses på figur 10.7, er det 46 % af den mængde vand der bliver indvundet fra Volsted Plantage, som påvirker vandføringen i Hølbækken inden for det første år.

10.3.2 Indkildestrømmen

Indkildestrømmen er omkring 4 km lang og har sit udløb til Landbækken. Vandløbet er beskyttet af Naturbeskyttelseslovens §3. Det er målsat som et B3 (karpefiskevand) vandløb. [Aalborg Kommune Teknisk Forvaltning, 2006] På figur 10.8 ses den modellerede vandføringstidsserie, med alle indvindninger.



Figur 10.8. Vandføring i Indkildestrømmen.

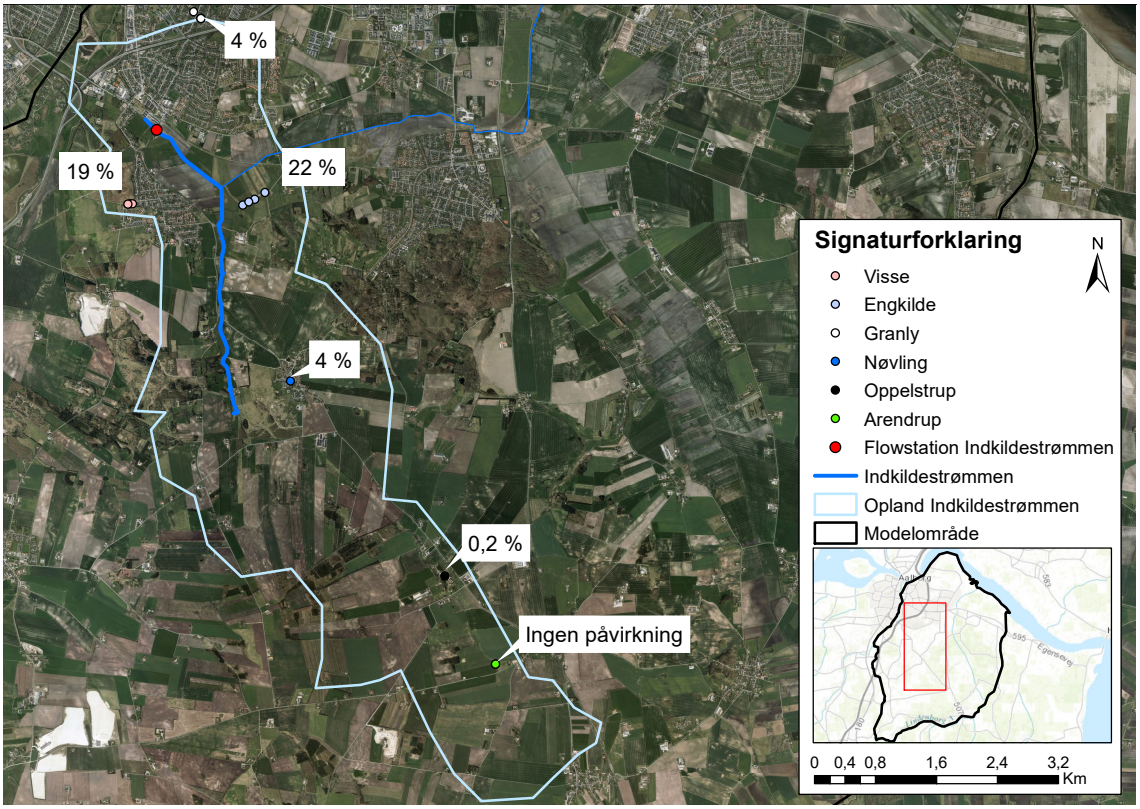
Der findes ikke observerede vandføringer fra Indkildestrømmen, og de modellerede vandføringer kan derfor ikke valideres. Dog ses der en større årlig variation på vandføringen i Indkildestrømmen end der ses ved Hølbækken, selvom flere årsminimumsvandføringer forekommer i vinterhalvåret. På baggrund af den modellerede vandføring i Indkildestrømmen, og de ti pejleserier der er udvalgt i kapitel 5 er der udfærdiget en prædiktionsmodel til prædiktion af årsminimumsvandføring i Indkildestrømmen. Idet den modellerede vandføringstidsserie ikke omfatter vandføringer fra før 1995, er det dog begrænset hvor mange år prædiktionsmodellen kan udfærdiges på baggrund af. På grund af manglen af pejleserier, og for at undgå en model der er overfitted, er det derfor besluttet udelukkende at benytte én pejleserie til prædiktionsmodellen, se tabel 10.5.

Prædiktionsmodel for Indkildestrømmen	
Pejleboring	34.571
Måned hvor pejling er foretaget	December
Korrelation, prædikteret vs. modelleret årsmin R^2	0,90
Signifikans niveau	0,005

Tabel 10.5. Prædiktionsmodel for Indkildestrømmen.

På trods af at prædiktionsmodellen er udfærdiget kun med en enkelt pejleserie, er forklaringsgraden forholdsvist høj, som det kan ses i tabel 10.5. Den bedste model er baseret på pejlinger foretaget i december.

På figur 10.9 ses placeringen og det topografiske opland til Indkildestrømmen, sammen med de kildepladser som ligger i eller i nærheden af det topografiske opland. Ud fra modelsimulationer er det beregnet, hvor meget hver enkelt kildeplads påvirker Indkildestrømmen.

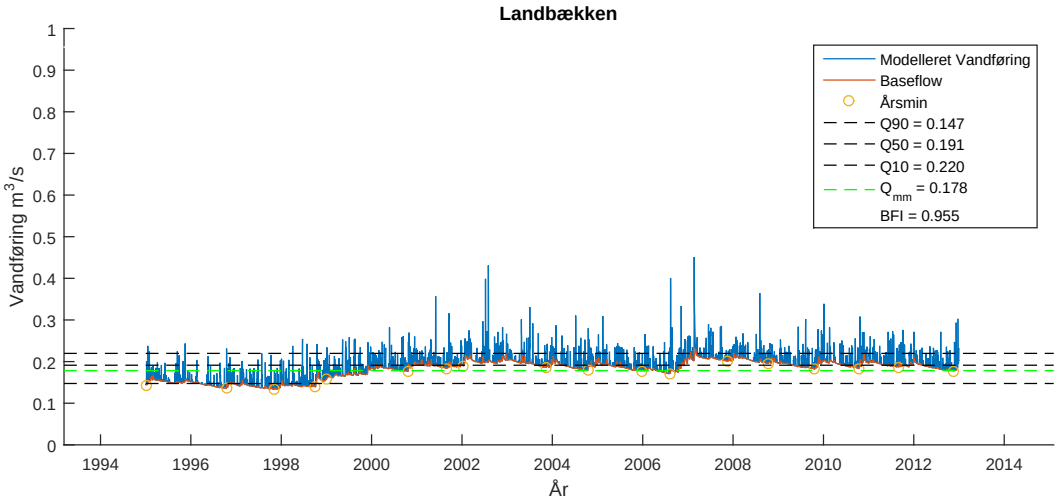


Figur 10.9. Indkildestrømmen med det tilhørende topografiske opland, hvor relevante kildepladsers påvirkning af vandløbet er beregnet for et år.

Alle modelkørsler er kørt med en konstant indvinding på 1.000.000 m^3/år. Vandløbspåvirkningsfits er udført for alle de kildepladser som påvirker vandløbet, disse ses i appendiks H.2. Kildepladsen til Granly vandværk ligger lige på grænsen af oplandet til Indkildestrømmen, og det er derfor ikke alt vand der indvindes her, som indgår i vandbalancen for det topografiske opland til Indkildestrømmen. Kildepladserne til Engkilde og Oppelstrup har ikke kapacitet til at indvinde 1.000.000 m^3/år, og derfor indvindes der en smule mindre her. På figuren er det angivet i procent hvor stor en del af indvindingen der direkte bliver taget fra vandføringen i Indkildestrømmen.

10.3.3 Landbækken

Landbækken har en længde på ca. 7 km og har sit udløb til Romdrup Å. På figur 10.10, er den modellerede vandføringstidsserie for Landbækken illustreret.



Figur 10.10. Vandføring i Landbækken.

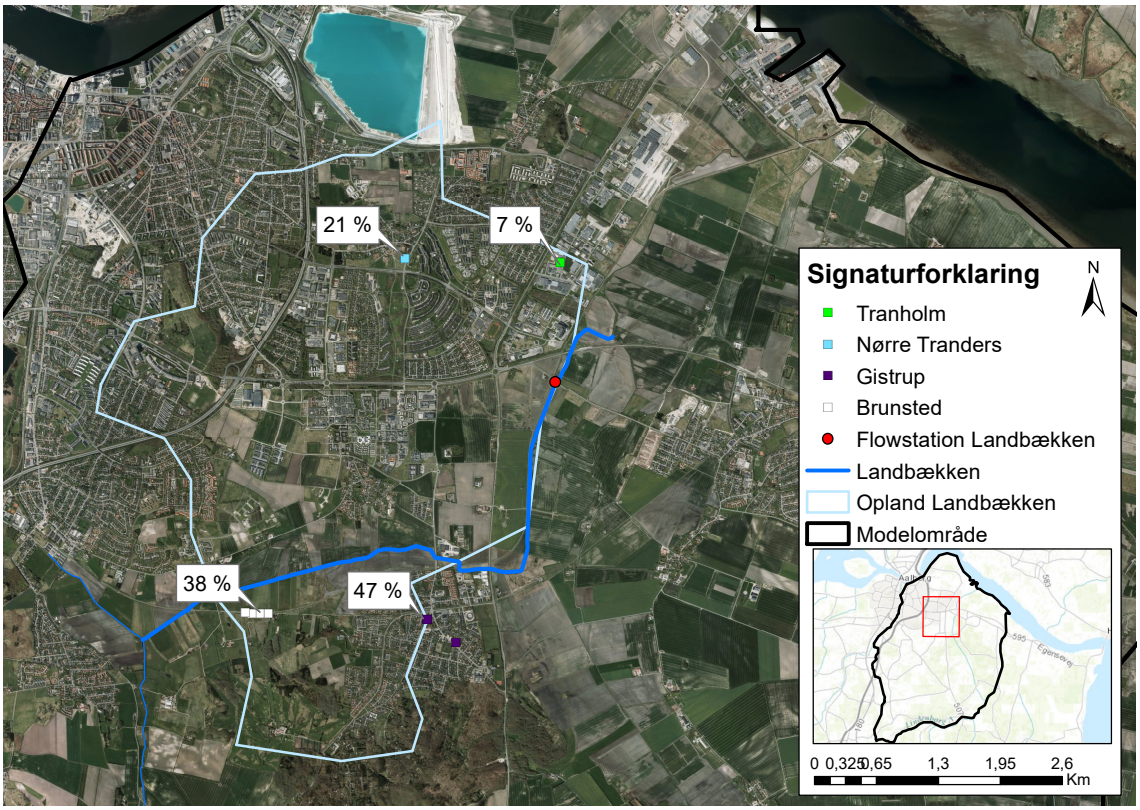
Da der ikke findes nogle målte vandføringer, kan de modellerede vandføringer i Landbækken ikke valideres, dog kan det ses ud fra figur 10.10, at baseflowet generelt er meget stabilt. Der er ligeledes udfærdiget en prædiktionsmodel for dette vandløb. Idet vandføringstidsserien omfatter den samme periode som tidsserien for Indkildestrømmen, er de samme begrænsninger ift. pejledata også her gældende, og prædiktionsmodellen er derfor baseret på en enkelt pejleserie. Resultatet heraf kan ses i tabel 10.6.

Prædiktionsmodel for Landbækken	
Pejleboring	34.571
Måned hvor pejling er foretaget	December
Korrelation, prædikteret vs. modelleret årsmin R^2	0,85
Signifikans niveau	0,008

Tabel 10.6. Prædiktionsmodel for Landbækken

Den bedste prædiktionsmodel er også her baseret på pejledata fra december måned. Forklaringsgraden er igen forholdsvist høj.

Placeringen af Landbækken samt det topografiske opland og de kildepladser der befinder sig heri er illustreret på figur 10.11. Vandløbspåvirkningsfits for de kildepladser der har en påvirkning på Landbækken kan ses i appendiks H.3. Den maksimale påvirkning efter ét års indvinding fremgår af figuren.

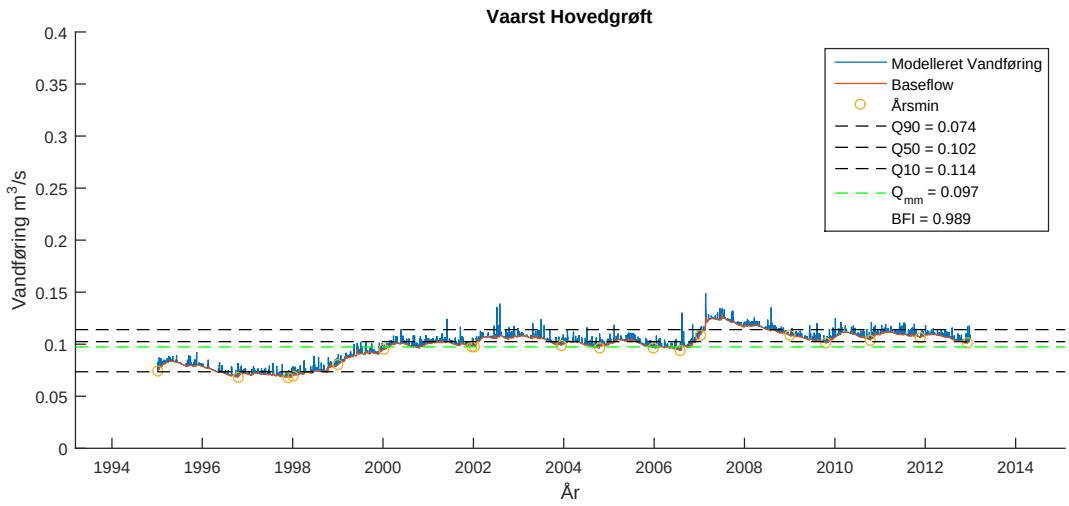


Figur 10.11. Landbækken med tilhørende topografisk opland, hvor relevante kildepladsers påvirkning af vandløbet er beregnet.

Som ved de øvrige analyserede vandløb, er det beregnet hvor stor en mængde af det vand der indvindes fra kildepladser i oplandet til Landbækken, der direkte påvirker Landbækken.

10.3.4 Vårst Hovedgrøft

Vårst Hovedgrøft har en længde på ca. 6 km og har udløb til Lindenborg Å. På figur 10.12, ses den modellerede vandføringstidsserie for Vårst Hovedgrøft.



Figur 10.12. Vandføring i Vårst Hovedgrøft.

Der findes ikke nogen målte vandføringer fra Vårst Hovedgrøft, og de modellerede

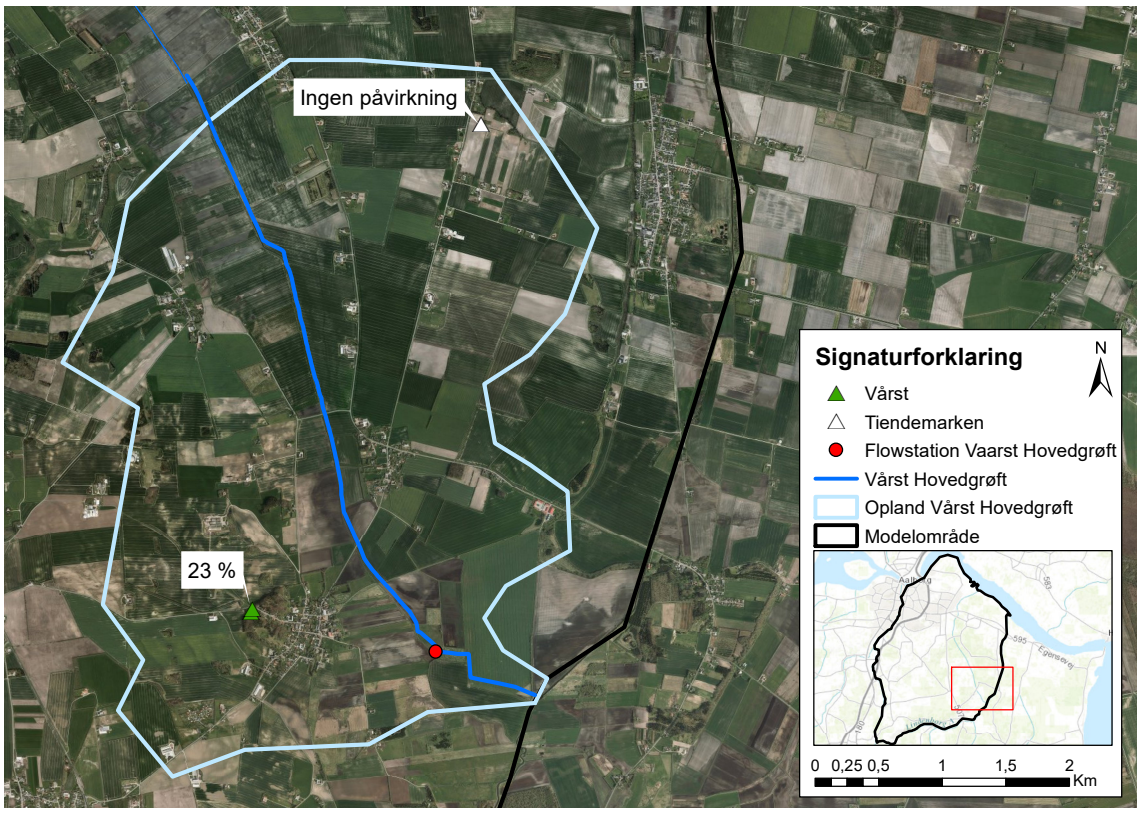
vandføringer kan derfor ikke valideres. Den modellerede vandføring i Vårst Hovedgrøft har ligesom øvrige modellerede vandføringer en tendens til at falde og stige over flere år, og der ses derfor ikke en tydelig årstidsvariation. En prædiktionsmodel er udført til vandløbet, og data fra denne kan ses i tabel 10.7. Der er ved dette vandløb gjort de samme overvejelser som ved de øvrige vandløb, og prædiktionsmodellen er dermed udført med data fra en enkelt pejleserie.

Prædiktionsmodel for Vårst Hovedgrøft	
Pejleboring	34.571
Måned hvor pejling er foretaget	December
Korrelation, prædikteret vs. modelleret årsmin R^2	0,92
Signifikans niveau	0,002

Tabel 10.7. Prædiktionsmodel for Vårst Hovedgrøft

Den bedste prædiktionsmodel er baseret på pejledata fra december måned. Forklaringsgraden er høj, og det vil dermed være muligt at prædiktere årsminimumsvandføringer.

Placeringen af Vårst Hovedgrøft, det topografiske opland og kildepladser i dette samt deres maksimale påvirkning af vandføringen i vandløbet efter 1 år, er illustreret på figur 10.13. I appendiks H.4, ses vandløbspåvirkningsfit for den kildeplads der ligger i det topografiske opland til vandløbet.



Figur 10.13. Vårst Hovedgrøft med tilhørende topografisk opland, hvor de to relevante kildepladsers påvirkning af vandløbet er beregnet.

10.4 Vurdering af kildepladsernes påvirkning

For at opstille de mest relevante eksempler med implementering af variable indvindingstilladelser, vurderes hvilke kildepladser som har det største potentiale. Der vurderes på, hvor

stor påvirkning hver enkelt kildeplads har på vandføringen i de respektive vandløb, hvor lang tid der går fra der ændres på en indvinding og til denne ændring kan ses på vandføringen i vandløbet, samt hvor meget vand der indvindes fra kildepladsen i forvejen. Tabel 10.8 er opstillet med min, maks og middel indvinding siden 1990, for alle kildepladser der er medtaget i denne analyse.

Kildeplads	**Indvinding**		
	Min [m^3/år]	Maks [m^3/år]	Middel [m^3/år]
Brunsted	290.000	1.110.000	650.000
Engkilde	569.000	1.212.000	855.000
Gistrup	0	54.000	21.000
Granly	68.000	165.000	100.000
Klarup	23.000	440.000	156.000
Lundby Krat	1.000.000	1.000.000	1.000.000
Nørre Tranders	21.000	41.000	35.000
Nøvling	1.000	35.000	19.000
Oppelstrup	19.000	41.000	31.000
Romdrup	0	26.000	12.000
Syrensparken	0	45.000	31.000
Tranholm	2400	400.000	135.000
Visse	73.000	117.000	87.000
Volsted Plantage	400.000	400.000	400.000
Vårst	18.000	100.000	38.000
Øster Uttrup	38.000	400.000	241.000

Tabel 10.8. Indvindning for de forskellige vandværker.

I det efterføglende vurderes, hvilke kildepladser som er interessante ift. de forskellige vandløb.

10.4.1 Romdrup Å

De otte kildepladser i det topografiske opland til Romdrup Å, der har den største påvirkning på vandløbet, er alle analyseret i nærværende kapitel. For at vurdere hvilke kildepladser der er mest ideelle til beregningseksempler, vurderes her resultaterne af denne analyse.

Responstider for alle nuværende kildepladser der ligger i det topografiske opland til Romdrup Å ses i tabel 10.4. Her ses det at der er to kildepladser (Klarup og Romdrup), hvor den fulde effekt af en ændret indvinding forekommer inden for ét år. I tabel 10.4, ses også responsen for den nye kildeplads i Lundby Krat, hvor det er meningen at der skal indvindes 1.000.000 m^3/år, her ses også en stor påvirkning inden for det første år, og endda inden for de første seks måneder.

Det kan ses på figur 10.4, at den største vandløbspåvirkning kommer fra kildepladserne; Lundby Krat, Klarup og Romdrup.

Den største vandløbspåvirkning på Romdrup Å for allerede etablerede kildepladser, ses ved kildepladsen i Romdrup. Her er responstiden også så lav, at det er muligt at ændre på indvindingen inden for prædiktionshorisonten. Responstiden ved kildepladsen i Klarup er ligeledes meget lav og idet den reelle indvinding i Klarup er 17 gange større end den er ved kildepladsen i Romdrup, vil den reelle trussel fra Klarup derfor være langt større. Den

nye kildeplads der er ved at blive etableret ved Lundby Krat, har en stor påvirkning på Romdrup Å, men da denne ikke er etableret endnu, findes der ikke indvindingstidsserier for denne kildeplads.

10.4.2 Andre vandløb

Ift. Indkildestrømmen er kildepladsen ved Engkilde, jf. figur 10.9 den kildeplads hvor den største påvirkning kan ses på vandføringen inden for et år.

Ift. Landbækken er kildepladsen ved Gistrup, den kildeplads hvor den største påvirkning kan ses på vandføringen inden for et år. Men da den reelle middelindvinding i Brunsted er ca. 30 gange højere end i Gistrup, samtidig med at vandløbspåvirkningen her efter ét års indvinding stadig er betydelig, arbejdes der videre med denne.

Der er ikke foretaget nogen udvælgelse for Hølbækken og Vårst Hovedgrøft, da der kun er én kildeplads der påvirker vandføringen inden for det topografiske opland. I tabel 10.9 er de ideelle kildepladser, til anvendelse i et konceptuelt eksempel i det følgende kapitel, listet op.

Vandløb	**Kildeplads**
Romdrup Å	Lundby Krat, Klarup og Romdrup
Hølbækken	Volsted Plantage
Indkildestrømmen	Engkilde
Landbækken	Brunsted
Vårst Hovedgrøft	Vårst

Tabel 10.9. Vandløb med de mest ideelle kildepladser til efterfølgende eksempler.

10.5 Opsamling

- Der er udfærdiget fits der er i stand til at beskrive påvirkningen af vandløb ved vandindvindng, uden det er nødvendigt at køre en grundvandsmodel.
- Der er flere kildepladser hvor responstiden er kort nok til at indvindingen kan ændres inden for prædiktionshorisonten, med tydelig effekt på vandføringen i vandløb.
- Andre vandløb er analyseret, og det vurderes at der også her er potentiale for implementering af variable indvindingstilladelser ved kildepladser i oplandet.
- Klarup vandforsyning har den største påvirkningen på Romdrup Å, ligesom responstiden også er hurtig. Dette gør denne kildeplads ideel til at teste hypotesen om, at variable indvindingstilladelser vil give mulighed for at kunne indvinde en større mængde vand.

Del III

Resultater og konklusion

I denne del opstilles en række forskellige konceptuelle eksempler, hvor prognosebaseret indvinding implementeres på kildepladser i projektområdet. Eksemplerne vil indeholde fremgangsmåde ved implementering, samt en validering af konceptet. Formålet med denne del er, at undersøge om der samlet set kan indvindes mere vand ved brug af prognosebaserede indvindingstilladelser, samtidig med at sårbar våd natur kan beskyttes bedst muligt og vandkvaliteten bevares.

Eksempler på anvendelse af prognosebaseret indvinding

11

I dette kapitel vil nogle forskellige eksempler, hvor prognosebaseret indvinding anvendes, blive gennemregnet. Hvert eksempel repræsenterer en kombination af kildepladser, vandløb og en løsningsmodel hvor indvindingen på kildepladsen er optimeret til at sikre en stabil vandføring i vandløb. I eksemplerne lægges der vægt på at resultaterne er sammenlignelige med et virkeligt scenarie, og derfor benyttes en usikkerhed på årsminimumsvandføringen der svarer til usikkerheden på prædiktionsmodellen. Tidshorisonten for data der benyttes i Mike SHE modellen og prædiktionsmodellen er vist i tabel 11.1.

	Start	**Slut**
Vandføringsdata	1970	2014
Pejledata (Prædiktionsmodel)	1970	1982
Historiske indvindingsdata	1988	2016

Tabel 11.1. År omfattet af benyttede tidsserier.

Som det ses i tabel 11.1 omfatter pejledata, indvindingsdata og vandføringsdata ikke den samme årrække, og det er derfor ikke muligt at anvende prædikterede årsminimumsvandføringer fra prædiktionsmodellen. For at opnå den samme usikkerhed på årsminimumsvandføringerne som er tilstede ved brug af prædiktionsmodellen er der derfor, på baggrund af de observerede årsminimumsvandføringer, fremstillet pseudo prædikterede årsminimumsvandføringer der dækker årrækken 1995 - 2014. Residualerne på de pseudo prædikterede årsminimumsvandføringer er sammenlignelige med residualerne på årsminimumsvandføringer beregnet med prædiktionsmodellen. Dette er sikret ved udførelse af en statistisk analyse af residualerne på årsminimumsvandføringerne beregnet med prædiktionsmodellen. Residualerne er normalfordelte, med en middelværdi på 0 og en standardafvigelse på 5,5. Ved hjælp af "tilfældige tal generator" i excel er residualer for alle observerede vandføringer genereret, og disse er lagt til de observerede vandføringer. Disse udgør dermed en erstatning for prædikterede vandføringer. Denne metode til bestemmelse af pseudo prædikterede årsminimumsvandføringer tager ikke højde for at residualer ved ekstrem hændelser kan være højere. Dette er tilfældet ved de få data valideringsmodellen omfatter. Det vurderes at dette er af mindre betydning, da residualerne kun er marginalt større, se afsnit 7.2.

De beregnede pseudo årsminimumsvandføringer benyttes som udgangspunkt til at variere indvindingen hvert år. De år hvor årsminimumsvandføringen er under medianminimumsvandføringen, ændres indvindingen på årsbasis, således at årsminimumsvandføringen tager samme størrelse som medianminimumsvandføringen, hvor det er muligt.

Til beregning af hvor meget vandløbet bliver påvirket ved indvinding benyttes modelfit udfærdiget i kapitel 10.2.2.

Det er ved indvinding tilladt at påvirke medianminimumsvandføringen i vandløb, med mellem 5 og 25 %, afhængig af vandløbets miljømålsklassifikation. I dette kapitel antages det at vandløbene allerede er påvirket af vandindvinding. Det antages derfor at medianminimumsvandføringen ikke må reduceres yderligere.

11.1 Eksempel 1: Kildeplads i Klarup

Ved dette eksempel undersøges det, hvorvidt det er muligt at indvinde mere vand fra kildepladsen i Klarup, idet årsminimumshændelser under medianminimumsvandføringen i Romdrup Å ønskes undgået. Medianminimumsvandføringen i Romdrup Å er bestemt på baggrund af historiske data til 33 l/s.

11.1.1 Fremgangsmåde ved implementering

Ved implementering af dette koncept, anvendes prædiktionsmodellen til at forudsige årsminimumsvandføringen hvert år. Prædiktionsmodellen er baseret på pejlinger foretaget i februar, og idet årsminimumsvandføringen i Romdrup Å oftest forekommer i august, giver det rundt regnet 6 måneder til at tilpasse indvindingen og dermed imødekomme en eventuelt lav, eller høj årsminimumsvandføring.

I tabel 11.2, er det illustreret ved et simplificeret eksempel hvordan arbejdsgangen foregår fra udlæsning af pejlinger i februar til tilpasning af indvinding. Når der er foretaget pejlinger i de boringer der danner grundlag for prædiktionsmodellen, prædikteres en årsminimumsvandføring, hvorefter indvindningen bestemmes for foråret, ved anvendelse af modelfit fra kapitel 10. Ved en lav årsminimumsvandføring kan indvindingen reduceres for at bibeholde så meget vandføring i vandløbet som muligt. Ved en høj årsminimumsvandføring kan indvindingen øges. Hvor meget indvindingen skal reduceres/øges afhænger af vandløbets oprindelige karakteristik.

År	**34.499**	**34.571**	**34.572**	$\mathbf{Q}_{min,pr}$	$\mathbf{I}_{før}$	$\mathbf{I}_{efter}$	$\mathbf{Q}_{min,est}$
1990	7,07	3,63	4,40	21	440.000	0	26
1991	7,31	4,22	4,74	31	430.000	260.000	33
2007	8,89	5,44	6,35	66	150.000	2.850.000	33

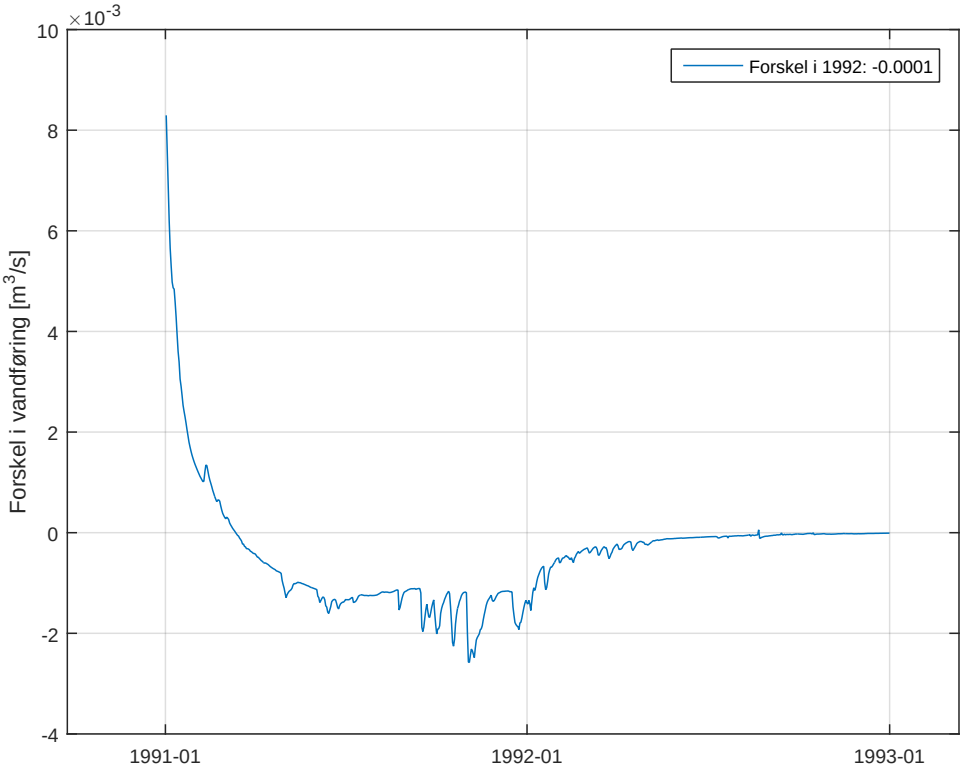
Tabel 11.2. Simplificeret eksempel på hvordan konceptet i praksis kan anvendes. Hvor kolonne 2,3 og 4 er pejlinger foretaget i de boringer der danner grundlag for prædiktionsmodellen, $\mathbf{Q}_{min,pr}$ er den prædikterede årsminimumsvandføring baseret på de tre pejlinger, $\mathbf{I}_{fr}$ er den oprindelige indvinding (er væsentlig da prædiktionsmodellen er udfærdiget med indvindinger), $\mathbf{I}_{efter}$ er den nye indvinding og $\mathbf{Q}_{min,est}$ er den estimerede årsminimumsvandføring i Romdrup Å efter indvindingen er tilpasset.

I eksemplet i tabel 11.2 er indvindingen i år 1990 er slukket, for at opnå så høj årsminimumsvandføring i Romdrup Å, som muligt. I 1991 er indvindingen reduceret, så årsminimumsvandføringen tager samme værdi som medianminimumsvandføringen. I år 2007 er årsminimumsvandføringen prædikteret meget højt, og derfor kan der indvindes store mængder vand fra kildepladsen i Klarup uden at årsminimumsvandføringen kommer ned på et kritisk niveau. Der kan i princippet indvindes 2.700.000 m^3 mere i år 2007. I realiteten skal konceptet bruges i realtid, og der vil derfor ikke være nogen oprindelig indvinding.

11.1.2 Fremgangsmåde for validering

Konceptet er beregnet til at skulle anvendes i realtid, men under validering anvendes historiske pejledata, vandføringsdata og indvindingsdata. Dette medfører at effekten af en ændret indvinding et enkelt år, ikke indgår i det følgende år. Indvindingen ved det første år er bestemt på samme måde som i afsnit 11.1.1. Herefter er der kørt en model i Mike SHE for at belyse effekten af denne ændring over en længere tidshorisont og derudfra er den nye årsminimumsvandføring bestemt. Dette er nødvendigt, da metoden er baseret på pejledata fra samme år, dvs. påvirkninger fra året før ikke indgår. Mike SHE modellen er ved udførelsen af dette eksempel benyttes således:

1. Indvinding et givent år ændres.
2. Mike SHE modellen med den nye indvinding køres.
3. Forskellen i vandføringen det næste år, som resultat af en ændret indvinding aflæses (se figur 11.1).
4. Trinene gentages for hvert år hvor indvindingen justeres.

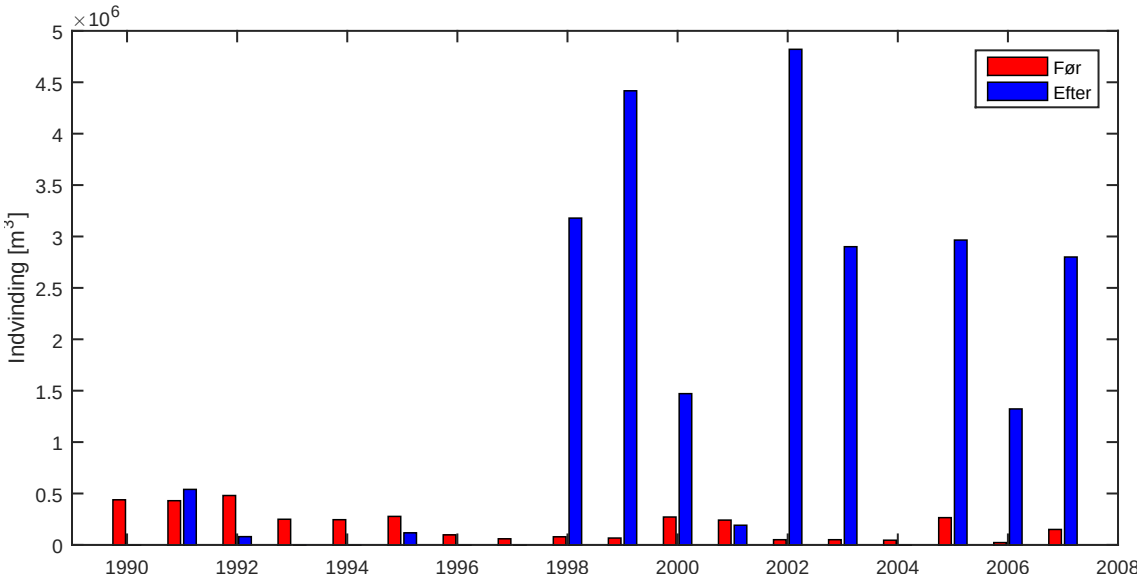


Figur 11.1. Eksempel på hvordan der tages højde for, at en ændret indvinding ændrer udgangspunktet. Indvindingen i 1991 er forøget kraftigt, hvilket påvirker vandføringen i Romdrup Å. I 1992 er indvindingen ved modellering justeret tilbage til udgangspunktet, og vandføringen i vandløbet går derfor tilbage til normal tilstand. Vandføringen er ikke gået helt tilbage til sin normale tilstand der hvor årsminimumsvandføringen indtræffer i 1992, og det er forskellen her der aflæses så der kan tages højde for dette ved ændring af indvindingen i 1992.

På figur 11.1, ses den modellerede forskel i vandføringen efter indvindingerne er justeret. Dette benyttes til at estimere vandløbspåvirkningen det følgende år efter indvindingen er justeret.

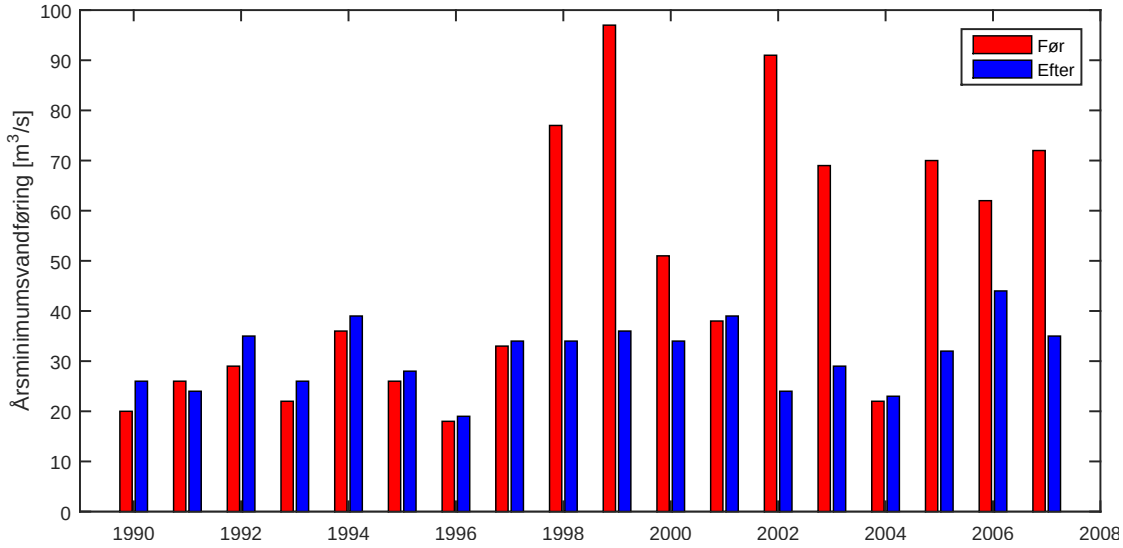
11.1.3 Resultater

Vandindvindingstidsserien ved dette eksempel før og efter justering af indvindingen kan ses på figur 11.2. Excelarket hvor udregningen er foretaget er i appendiks A.10.



Figur 11.2. Indvinding før og efter brug af prognosebaseret vandindvinding.

Samlet kan der ved dette eksempel i gennemsnit indvindes 1.400.000 m^3 mere pr. år. Det skal dog bemærkes at der de år, hvor der slækkes på indvindingen for at øge årsminimumsvandføringen i Romdrup Å, skal indvindes mere vand et andet sted. I dette tilfælde er det en vurderingssag, hvor det er mest skånsomt at indvinde. Årsminimumsvandføringer før og efter brugen af prognosebaseret vandindvinding kan ses på figur 11.3.



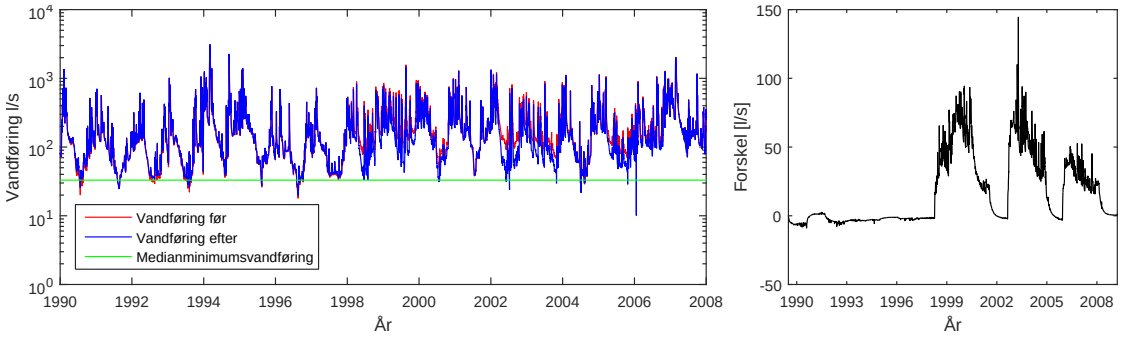
Figur 11.3. Årsminimumsvandføring før og efter brug af prognosebaseret vandindvinding.

Det ses tydeligt på figur 11.3 at årsminimumsvandføringen varierer langt mindre fra år til år efter implementering af prognosebaseret vandindvinding. Ændringen i vandføringen kan ses i tabel 11.3.

	Før [l/s]	Efter [l/s]
Q_{mm}	33	33
Q_{min}	18	19
Q_{max}	97	44

Tabel 11.3. Median-, minimum og maksimum årsminimumsvandføringer før og efter brug af prognosebaseret vandindvinding.

Det er altså bemærkelsesværdigt, hvor stor en ekstra vandmængde det er muligt at indvinde fra systemet. I dette eksempel er det vist hvordan et vandløb som Romdrup Å kan beskyttes mod meget lave årsminimumsvandføringer, samtidig med at der samlet kan indvindes mere vand. Idet modelfittet ikke er i stand til at tage højde for ændringen i vandføring fra år til år, foresaget af en ændret indvinding, er den komplette forskel i vandføringen med den oprindelige indvinding, og med den nye indvinding modelleret i Mike SHE (Se afsnit 11.1.2). Dette kan ses i figur 11.4.



Figur 11.4. Observeret vandføring i Romdrup Å, plottet sammen med ændringen i vandføringen efter indvindingerne er ændret. Ændringen er modelleret i Mike SHE.

Vandføringen i Romdrup Å er ikke ændret meget, men dog er vandføringen i vandløbet øget marginalt de år hvor årsminimumsvandføringen er lav. Når der er rigelige mængder vand i Romdrup Å, er indvindingen øget og vandføringen dermed reduceret. I dette eksempel er vandføringen i Romdrup Å modelleret i Mike SHE for på den måde at undersøge hvor stor påvirkning en ændring i indvindingen har året efter en indvinding er op- eller nedjusteret.

De år hvor indvindingen er øget, pga. en høj vandføring i Romdrup Å, er der det følgende år modelleret en maks forskel i vandføringen på 4 l/s ift. den oprindelige vandføring. Den maksimale forskel på 4 l/s, er ved en forøgelse af indvindingen på kildepladsen i Klarup på 76 gange (Se figur 11.2 år 1999), det kan derfor konkluderes at historikken ikke har betydelig indflydelse. Da forskellen på vandføringen i Romdrup Å, året efter en indvinding er opjusteret, ikke er større, vil det følgende eksempel vil historikken i systemet ikke medtages, da det vurderes at gevinsten ved dette er negligerbar.

11.2 Eksempel 2: Flere kildepladser og vandløb

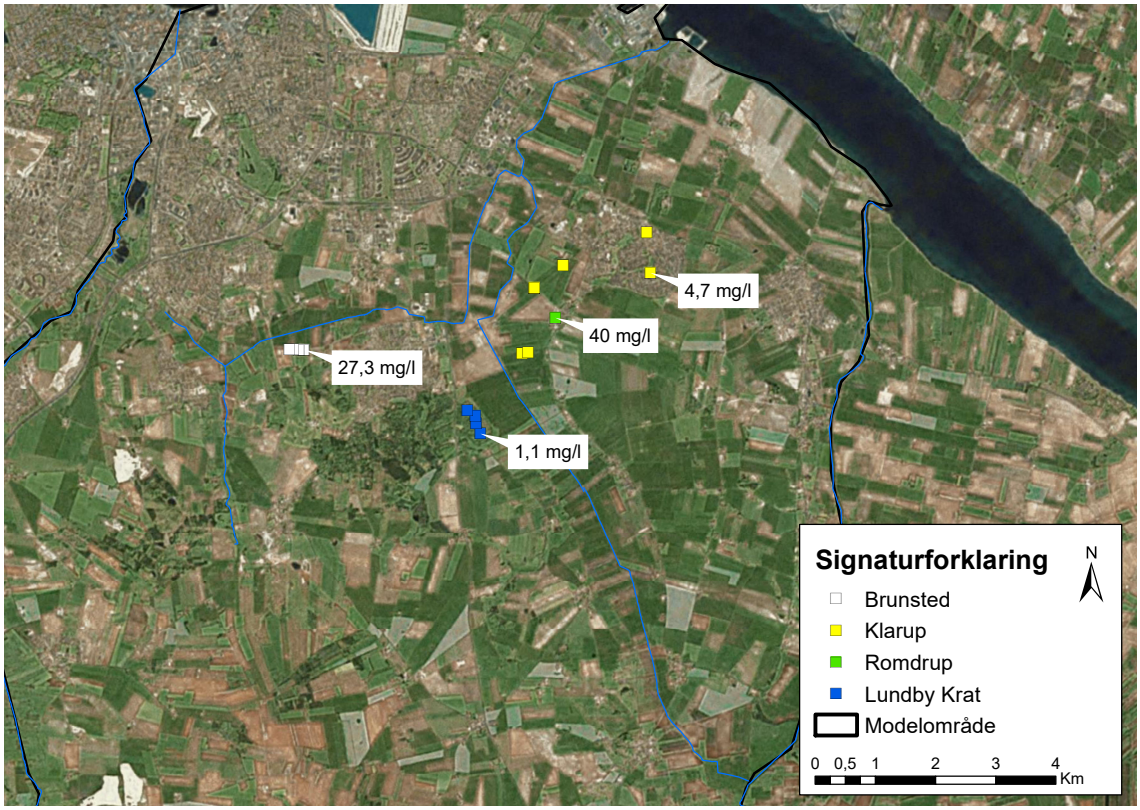
Ved dette eksempel ses der på samspillet mellem flere kildepladser. For at basere eksemplet på et kritisk scenarie, og da det ikke er undersøgt hvordan en forhøjet indvinding påvirker øvrige naturområder, fokuseres der i dette eksempel på de kildepladser der påvirker Romdrup Å mest. Da kildepladsen i Brunsted både påvirker vandføringen i Romdrup Å og i Landbækken, tages der udgangspunkt i disse to vandløb. Det har vist sig at særligt tre kildepladser, har en stor påvirkning på Romdrup Å, disse er Lundby Krat, Klarup

og Romdrup, se kapitel 10. Ift. Landbækken er det kildepladsen i Brunsted, som har den største påvirkning. Derfor anvendes disse fire kildepladser i dette eksempel.

I eksempel 1, er det påvist, at der kan indvindes mere vand, ved implementering af prognosebaseret indvinding, ved én kildeplads, og derfor er det en selvfølge at der også kan indvindes mere ved inkludering af flere kildepladser. Derfor inkluderes også nitratkoncentrationer i dette eksempel, for at vise hvordan dette koncept også kan benyttes, til at forbedre drikkevandskvaliteten. Hvis der i år med høj grundvandsdannelse f.eks. indvindes mere vand i Lundby Krat, hvor nitratkoncentrationen er lav, vil den samlede nitratkonentration i drikkevandet også blive lavere.

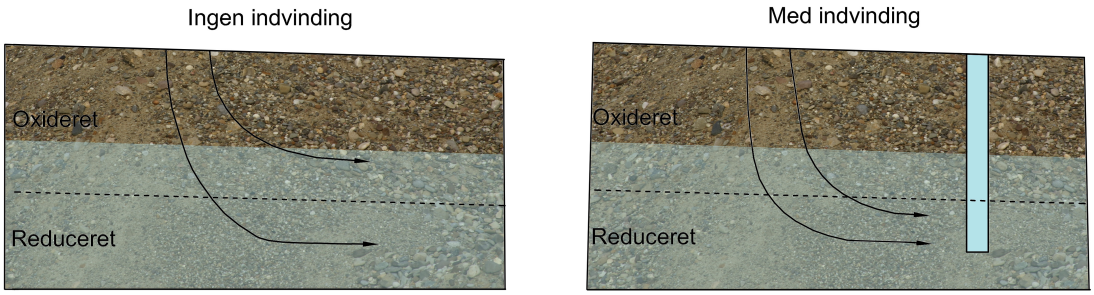
Derfor forsøges der at 'spare' på vandet ved kilderpladser med høj nitrat koncentration, når der er en høj vandføring i vandløbene.

Før der kan ændres på indvindingen undersøges nitrat koncentrationen på de udvalgte kildepladser, og disse er illustreret på figur 11.5.



Figur 11.5. Nitrat koncentrationer for de fire kildepladser, som indgår i eksemplet. Så der kan vurderes hvilke kildepladser der er truet.

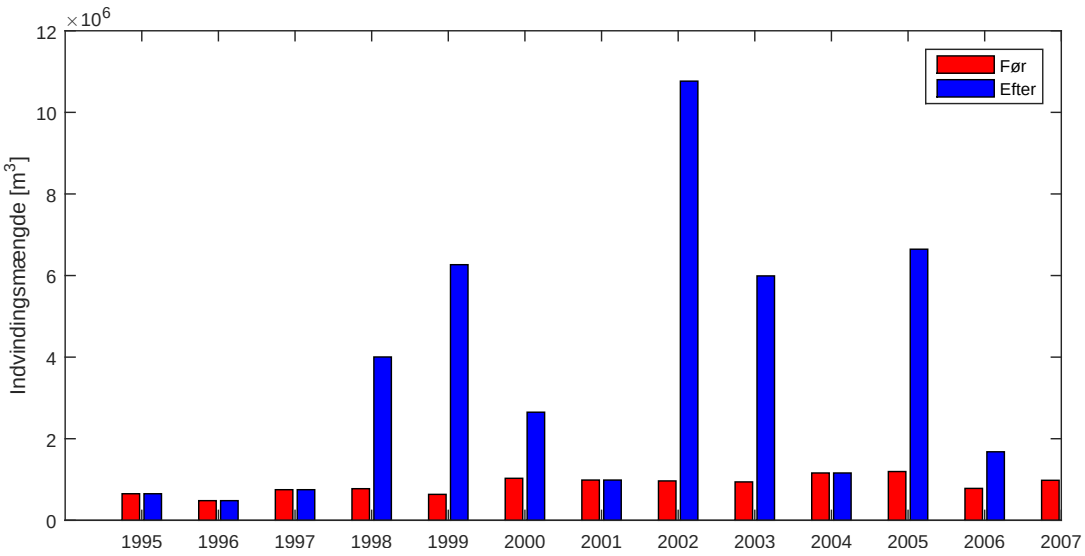
Det fremgår af figur 11.5, at nitrat koncentrationen ved kildepladserne Klarup og Brunsted er væsentlig højere end nitrat koncentration ved kildepladserne i Romdrup og Lundby Krat. Den laveste koncentration findes ved Lundby Krat, formentlig fordi der ikke er blevet indvundet vand endnu. Når der ikke er nogen indvinding er opholdstiden længere end når der indvindes, dette er skitseret på figur 11.6. Hvis opholdstiden reduceres, reduceres også nedbrydningen af nitrat, hvilket kan påvirke vandkvaliteten negativt.



Figur 11.6. Skitse af vandets bevægelse ned gennem jorden både med og uden indvinding. Det er kun under redoxgrænsen hvor nitrat reduceres. Når transportentiden forminskes ved indvinding, reduceres nitraten ikke lige så meget.

De estimerede pseudo prædikterede årsminimumsvandføringer, er bestemt på samme måde som i afsnit 11.1.

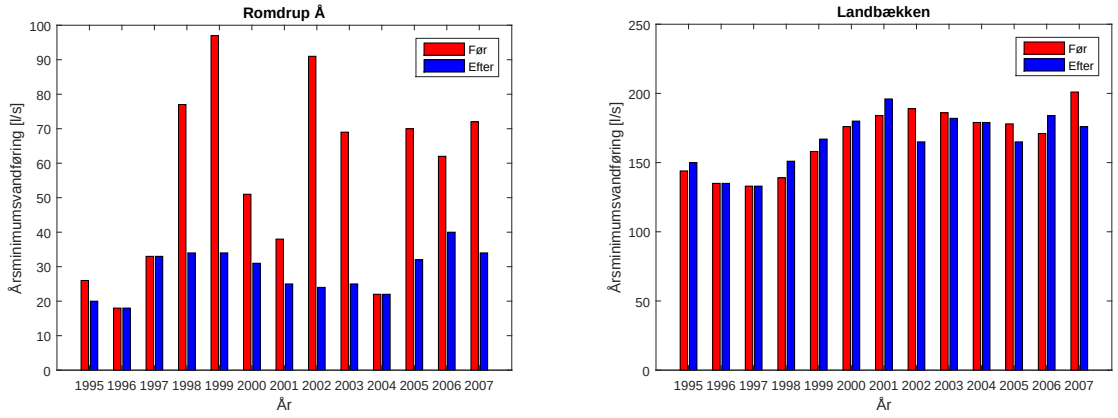
Der ændres på indvindingerne på baggrund af de pseudo prædikterede årsminimumsvandføringer. Det bestræbes, at indvindingsmængden bevares, de år hvor årsminimumsvandføringen er under Q_{mm}. Samtidig ønskes årsminimumsvandføringen forøget, således at årsminimumsvandføringen er på samme niveau som medianminimumsvandføringen. Dette gøres ved at fordele indvindingen ud på andre kildepladser, hvor det er muligt. Excelarket hvor udregningen er foretaget er i appendiks A.11. På figur 11.7 fremgår den samlede indvinding før og efter ændringen.



Figur 11.7. Indvinding før og efter brug af prognosebaseret vandindvinding.

Det ses på figur 11.7 at der i flere år kan indvindes en hel del mere vand. Men der er på flere af kildepladserne slukket for indvindingen, de år hvor det er kritisk for vandføringen i vandløbende, den manglende mængde vand er indvundet ved Lundby Krat. I dette eksempel prioriteres den tilgængelig vandresource højere end den økologiske tilstand i vandløb, derfor er der i eksemplet i enkelte tilfælde gået på kompromis med årsminimumsvandføringen i vandløbene, for at kunne indvinde den mængde vand som forbruges. De år hvor der kan indvindes mere vand ved Klarup, Brunsted, Tranholm og Lundby Krat kan der eventuelt indvindes mindre på andre kildepladser, og på den måde kan en miljøindsats målrettes.

Resultatet af undersøgelsen for årsminimumsvandføringerne for både Romdrup Å og Landbækken fremgår af figur 11.8.



Figur 11.8. Årsminimumsvandføring før og efter brug af prognosebaseret vandindvinding.

Jævnfør figur 11.8 varierer årsminimumsvandføringen før justeringen meget mere i Romdrup Å end efter justeringen, men årsminimumsvandføringen er også faldet lidt. For Landbækken er variationerne ikke lige så store. I tabel 11.4 fremgår median, minimum og maksimum af den årrække af årsminimumsvandføringer fra før og efter implementering af prognosebaseret indvinding.

	Romdrup Å			**Landbækken**	
	Før [l/s]	Efter [l/s]		Før [l/s]	Efter [l/s]
Q_{mm}	33	31	Q_{mm}	176	167
Q_{min}	18	18	Q_{min}	133	133
Q_{max}	97	40	Q_{max}	201	196

Tabel 11.4. Median-, minimums- og maksimumsvandføringer før og efter brug af prognosebaseret vandindvinding.

Det er ikke kun i de år, hvor der er en høj vandføring i vandløbene, dette koncept kan benyttes til fordel. Selvom der i eksemplerne er skruet helt ned for indvindingen i år hvor der er en lav vandføring i vandløbene, er det ikke nødvendigt ved en eventuel implementering. Grunden til dette er at modelfittene er årsbaseret og ikke månedsbaseret. Oftest er responstiden helt ned til fire måneder ved de kildepladser som har den største påvirkning på vandløbende. Det betyder, at hvis en indvinding helt lukkes, vil der kun gå fire måneder før den fulde effekt ses på vandløbet. I flere tilfælde ses en stor effekt allerede en enkelt måned efter en indvinding er blevet justeret, og det drejer sig derfor reelt kun om en mindre periode hvor det vil være nødvendigt at slukke helt for, eller skrue en indvinding drastisk meget ned. Alle måneder fra årets start og til fire måneder før årsminimumsvandføringen indtræffer og alle måneder efter årsminimumsvandføringen er indtruffet, vil indvindingen kunne have den normale størrelse. Et andet aspekt der ikke er undersøgt i nærværende rapport, er muligheden for at udnytte de varierende responstider der er på de forskellige kildepladser. I realiteten vil det være en mulighed at slukke indvindingen på kildepladser der har en meget hurtig respons, i tilfælde af kritisk lave vandføringer i vandløb, for så at skrue op for indvindingen de steder hvor responstiden er meget langsom, for at udskyde effekten af indvinding.

11.3 Opsamling

- Det er i nærværende kapitel vist hvordan prognosebaseret indvinding kan implementeres, samt hvordan det kan benyttes til at forbedre forsyningssikkerheden og samtidig målrette indsatser ift. vandløbs kvantitative tilstand.

- De år hvor der på grund af en høj vandføring i vandløb kan indvindes mere vand, kan der oftest indvindes meget mere vand ind hvad der er behov for.

- Modelfittene er en simpel måde at bestemme kildepladserne påvirkning på nærliggende vandløb, derfor tages der ikke højde for de fysiske begrænsninger, der kan være ved magasinet, som magasinets ydelse. Dvs. er magasinet overhovedet i stand til at levere disse store mængder vand på så kort tid.

- Der er flere parametre, som kan tages i betragtning ved planlægning af hvor grundvandet skal indvindes henne. Ift. kvaliteten af vandet og vandkemien, er der i eksempel 2 taget udgangspunkt i nitrat, men der er mange andre stoffer, som også kan være et problem ift. grundvandskvaliteten.

- Ved at gøre indvindingstilladelserne månedsbaseret, vil det være muligt at korrigere indvinding endnu mere præcist, da responstiden i flere tilfælde er så kort at en korrektion af indvinding nogle få måneder før årsminimumsvandføringen indtræffer er tilstrækkeligt til at undgå de laveste vandføringer.

Konklusion 12

I nærværende rapport er potentialet for implementering af variable indvindingstilladelser undersøgt. I den forbindelse er sammenhængen mellem vandføring i vandløb og grundvandspotentialet undersøgt, for at finde ud af om det er muligt at prædiktere lave vandføringer. Der ses en tydelig sammenhæng mellem grundvandspotentiale i vinter/forårs månederne og vandføringen i vandløb, med korrelationer op til $R^2 = 0{,}80$. For dette koncept er det essentielt at lave vandføringshændelser kan prædikteres flere måneder før årsminimumsvandføringen indtræffer, da det skal være muligt at foretage en ændring af indvindingen, og opnå en effekt på vandføringen i vandløb inden for prædiktionsperioden. Derfor undersøges korrelationen mellem grundvandspotentiale og årsminimumsvandføring, baseret på hvilken måned middelpejlingen er foretaget i. Ift. korrelationen mellem grundvandspotentiale og vandføring i vandløb, ses også en tydeligt sammenhæng med vandløbets BFI-indeks. Vandløb med et højt BFI-indeks har en større korrelation med grundvandspotentiale end vandløb med et lavt BFI-indeks, hvilket også er forventeligt.

Ved undersøgelsen af korrelationerne mellem grundvandspotentiale og vandføring i vandløb, er der ved flere pejletidsserier observeret faldende korrelationer hen over foråret. Denne udvikling er ikke forventet, og derfor er det undersøgt, hvorfor denne tendens forekommer. Det er ikke muligt at konkludere entydigt på hvad denne tendens kan skyldes, dog findes det sandsynligt, at det kan skyldes en drastisk ændring af grundvandspotentialet der forekommer over meget kort tid i foråret. Denne ændring forekommer ikke på det eksakt samme tidspunkt hvert år, og derfor giver det andledning til store usikkerheder, ved prædiktion af årsminimumsvandføring i denne periode.

De udfærdigede prædiktionsmodeller er baseret på pejlinger foretaget i vintermånederne, og prædiktionen af årsminimumsvandføringen i Lindenborg- og Romdrup Å, viser tilfredsstillende resultater, med en middelfejl ved Romdrup Å på 7 l/s eller 24 % og for Lindenborg Å på 105 l/s eller 6 %.

Det er undersøgt om inkluderingen af nedbør vil give anledning til mere præcise prædiktionsmodeller. Det viser sig, at variationer i nedbør i forårsmånederne har en påvirkning på årsminimumsvandføringen, og det er i den forbindelse observeret at nedbør fra fem måneder før og til årsminimumsvandføringen indtræfer, giver den bedste forklaring mellem nedbør og årsminimumsvandføring. Da det ikke er muligt, at fremskrive nedbøren præcist over så lang en periode, er det på nuværende tidspunkt ikke muligt at inkludere nedbøren i prædiktionsmodellen.

Der foreligger forslag til en ny metode (Vandplan 2 metoden) til bestemmelse af vandløbspåvirkningen, derfor er det undersøgt om der kan udfærdiges en prædiktionsmodel baseret på parametrene der indgår i denne. Ud af de seks parametre der indgår i metoden, er det kun Q_{90}, der viser en god korrelation med grundvandspotentialet. Alle andre

parametre viser stort set ingen forklaring, med korrelationer mellem 0,001 til 0,3. Idet Q_{90} kun indgår i beregningen af kvalitetsratioen for mikroinvertebrater, vurderes det at det ikke er muligt, at prædiktere vandløbspåvirkning ved brug af denne metode.

Der er ved de prædikterede vandføringer enkelte år, hvor residualerne er bemærkelsesværdigt større end gennemsnittet. Disse afvigelser kan skyldes, at der i nogle år falder mere nedbør i forårs/sommer månederne, eller at vandføringen i vandløb enten er meget høj eller meget lav. Der spekuleres derfor i, om det er muligt at udvikle en metode, hvorved de år hvor modellen har dårlige betingelser kan identificeres. Hvis det er muligt at identificere disse år, kan der kompenseres for dette ved bestemmelse af indvindingstilladelser.

Der er udfærdiget fits, der gør det muligt at beregne vandløbspåvirkning på en simpel og hurtig måde vha. superpositionsprincippet. Der er flere kildepladser i oplandet til Romdrup Å, hvor responstiden er så kort, at det er muligt at ændre indvindingen, og opnå næsten den fulde effekt på vandføringen i vandløb inden for prædiktionshorisonten. Dette betyder at det ved disse kildepladser er muligt at implementere variable indvindingstilladelser. Der er udover Romdrup Å også analyseret en række andre vandløb i modelområdet, og det vurderes at det er muligt at implementere variable indvindingstilladelser ved størstedelen af disse.

Potentialet af en implementering af prognosebaserede indvindingstilladelser er testet ved et eksempel. Her er der indraget én kildeplads hvorfra der beregnes vandløbspåvirkning, når indvindingen varieres baseret på prædikterede årsminimumsvandføringer, i Romdrup Å. I dette eksempel skal det bemærkes at der de år, hvor der slækkes på indvindingen, for at øge årsminimumsvandføringen i Romdrup Å, skal indvindes mere vand et andet sted. Det er i dette tilfælde en vurderingssag, hvor det er mest skånsomt at indvinde. I eksemplet er dette vurderet ud fra afstanden til vandløbene og responstiden. Det burde også være muligt, at udnytte de forskellige responstider der er på kildepladserne, ved at nedsætte indvindningen på kildepladser med en hurtig reponstid, i kritiske perioder og hæve indvindingen på kildepladser med en langsom reponstid. Ved yderligere at gøre indvindingstilladelser månedsbaseret, vil det være muligt at målrette en indsats mere præcist, og derved kun ændre på indvindingen i de specifikke perioder, hvor vandføringen i vandløb er kritisk lav.

Det er også muligt at forbedre vandkvaliteten ved anvendelse af dette koncept. Da der de år hvor der kan indvindes mere vand, ofte kan indvindes meget mere end hvad der er behov for. Derved er det muligt i disse år, at reducere indvindingen på de kildepladser, som har en høj koncentration af nitrat eller på anden måde har nedsat vandkvalitet, herved opnås der en bedre vandkvalitet. Dette kræver dog en sammenkobling af vandværkerne, samt at hvert vandværk har kapacitet til at øge indvindingen.

Implementeringen af variable indvindingstilladelser kan give en bedre forsyningssikkerhed, og en bedre kontrol med vandløbspåvirkningen. Derved vil en helhedsplan over et større område, både give mulighed for forbedring af vandkvalitet og vandløbs miljøklassifikationen, ved en priotering af hvor indvindingen har den mindste effekt.

Litteratur

Aalborg Forsyning (2015). Mere om projektet i Lundby Krat. URL: https://www.aalborgforsyning.dk/vand/om-vand-as/nye-anlaegsarbejder/lundby-krat/mere-om-projektet-i-lundby-krat.aspx. Downloadet: 29-03-2016.

Aalborg Kommune (2012). Vvm-redegørelse, miljøvurdering og habitatkonsekvensvurdering volsted plantage. Rapport.

Aalborg Kommune Teknisk Forvaltning (2006). Lokalplan 07-038 boliger, indkildestrømmen gug. Rapport.

Brink, D. (2006). Statistik. Nr. ISBN: 87-7681-012-7 i Handbook. Ventus Publishing ApS.

COWI (2013). Markvanding og vandløb. Rapport.

Danmarks Naturfredningsforening (2010). Grundvand. URL: http://www.dn.dk/Default.aspx?ID=7315. Downloadet: 10-09-2015.

DMU (2004). Andvendelse af vandrammedirektivet i danske vandløb. Rapport.

GEUS (2014). Implementering af modeller til brug for vandforvaltning. delprojekt: Effekt af vandindvinding. Rapport.

GEUS (2015). Jupiter Databasen - Boringsdatabasen. URL: kortlink.dk/mc7g. Downloadet: 01-09-2015.

Grøber, D., Wiberg-Larsen, P., Bøgestrand, J. og Baattrup-Pedersen, A. (2014). Vurdering af effekten af vandindvinding på vandløbs økologiske tilstand. Rapport.

Gustard, A., Bullock, A. og Dixon, J. (1992). Low flow estimation in the united kingdom. Rapport.

Institut, D. M. (2008). Korrektion for fejlkilder på måling af nedbør. Rapport.

Iversen, C. H., Lauritsen, L. U., Nyholm, T. og Kürstein, J. (2008). Udpegning af indvindings- og grundvandsdannende oplande (Del 1). URL: http://gk.geus.info/xpdf/udpegning-af-indvindingsoplande_hjemmeside.pdf. Downloadet: 12-05-2016.

Jellesen, C. S. (2015). Modeludvikling til sæsonmæssig prædiktion af sommerminimumsafstrømning. Rapport.

Jensen, O. E., Jensen, N. P. og m.fl. (2013). Arbejdsnotat om balance mellem vandforekomster og vandindvinding til markvanding. Rapport.

Miljø- og Fødevareministeriet, Naturstyrelsen (2013). Ny status for lukning af boringer. URL: http://naturstyrelsen.dk/nyheder/2013/dec/ny-status-for-lukning-af-boringer/. Downloadet: 10-09-2015.

Miljøministeriet (2012). Retningslinjer for udarbejdelse af indsatsprogrammer. Rapport.

Miljøministeriet Naturstyrelsen (2011). Vandplan 2009 - 2015 linfjordenl. Rapport.

Miljøportalen (2015). Arealinformation. URL: `http://arealinformation.miljoeportal.dk/distribution/`. Downloadet: 10-09-2015.

Miljøstyrelsen (1979). Vandforsyningsplanlægning 2.del. Rapport.

Nathan, R. og McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis. Rapport.

Refsgaard, J. C., Troldborg, L., Henriksen, H. J., Højberg, A. L., Møller, R. R. og Nielsen, A. M. (2010). God praksis i hydrologisk modellering. URL: `http://gk.geus.info/xpdf/geovejl7_god_praksis_i_hydrologisk_modellering_m_app_20100531_net.pdf`. Downloadet: 18-04-2016.

Stine, R. A. (1985). Bootstrap prediction intervals for regression. Journal of the American Statistical Association, 80:1026-1031.

U.S. Geological Survey (2012). Streamflow depletion by wells-understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow. Rapport.

Elektronisk Appendiks A

Elektronisk appendiks findes på linket: [kortlink.dk/mcwu] under følgende titler.

A.1 Script til baseflow separering og beregning af vandløbs parametre

A.2 Scripts til analyse af pejledata

A.3 Plots med antal pejlinger om året

A.4 Script til analyse af pejledata fra Voldsted Plantage

A.5 Scripts til udførelse af regressionsanalyse

A.6 Excel ark med resultater fra signifikansanalyse

A.7 Script til analyse af regn

A.8 Excel ark med dræntidskonstant resultater

A.9 Excel ark med alle vandbalance resultater

A.10 Eksempel 1 - Excel ark med 1 kildeplads

A.11 Eksempel 2 - Excel ark med flere kildepladser og vandløb

Karakterisering af Vandføring

B

B.1 Digital filter method

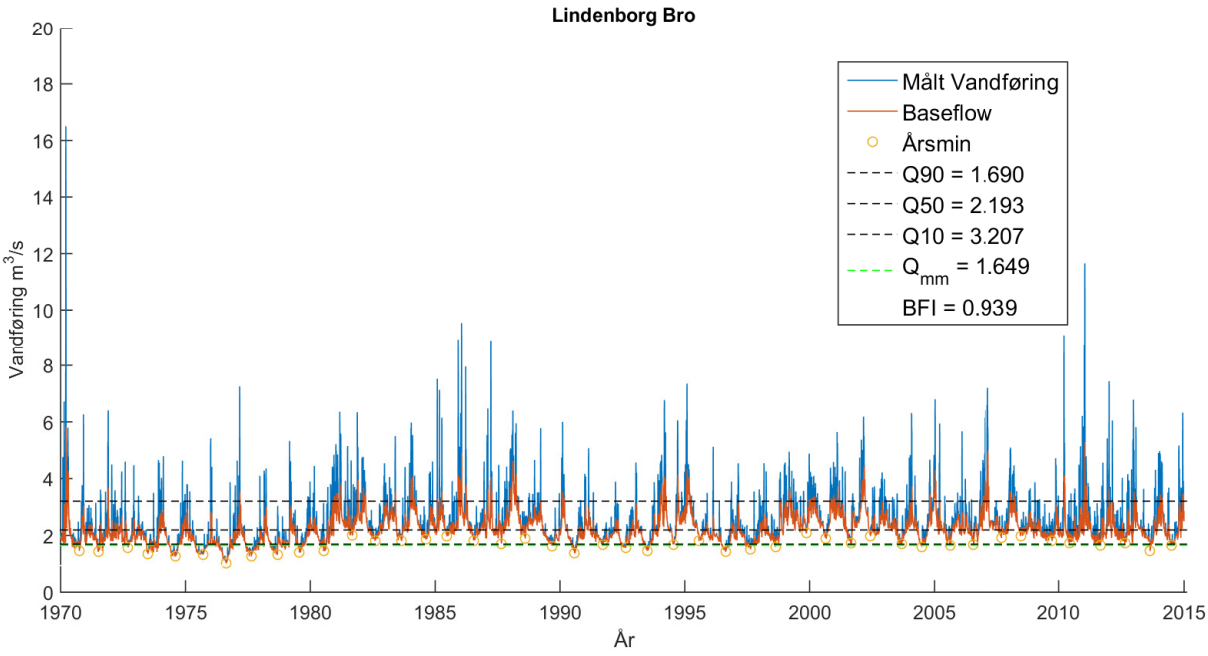
Udregningen af baseflow vha. "The digital filter technique"er baseret på formel B.1.

$$q_t = \beta \cdot q_{t-1} + \frac{1+\beta}{2} \cdot (Q_t - Q_{t-1}) \tag{B.1}$$

Hvor

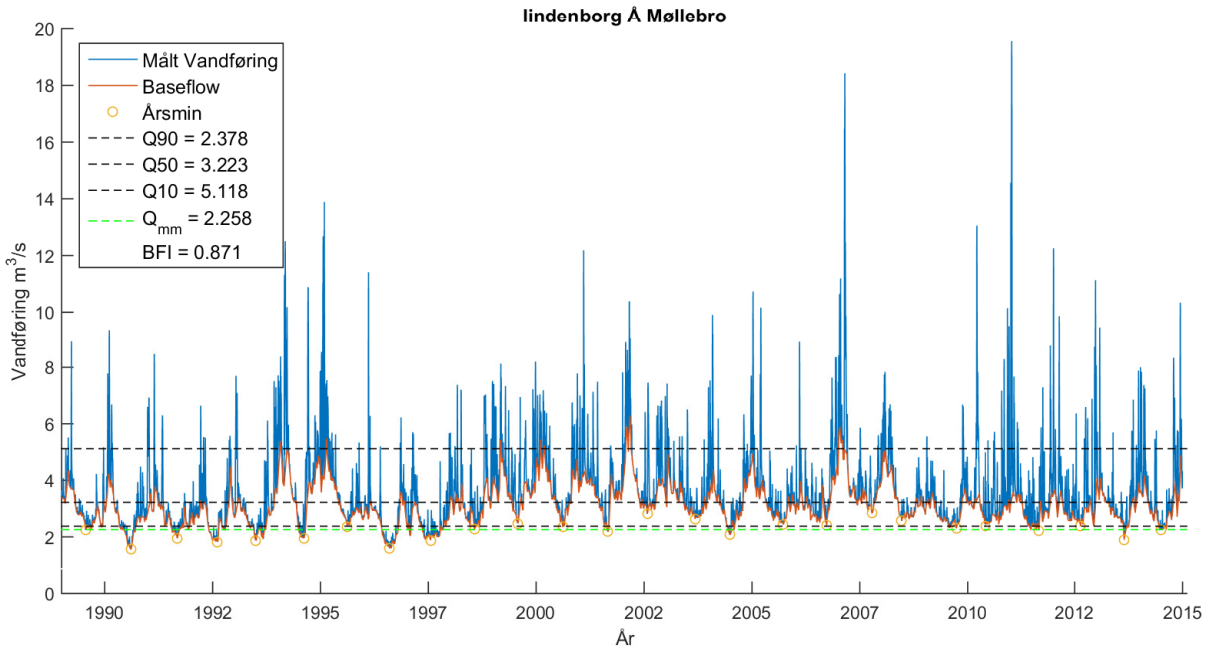
q_t	Filtreret overflade afstrømning	l/s
β	Filter Parameter	0.925
Q_t	Døgnmiddelvandføring	l/s

Ved brug af Nathan og McMahon [1990] fås baseflow for Lindenborg Bro som i figur B.1.



Figur B.1. Vandføringstidsserie samt hydrologiske parametre for målestationen ved Lindenborg Bro. Baseflow og BFI er beregnet vha. Nathan og McMahon [1990]

Ifølge baseflow separeringen udført vha. Nathan og McMahon [1990] fås et baseflowindeks (BFI) på 0,939 hvilket indikerer at Lindenborg å i høj grad er grundvandsfødt.



Figur B.2. Vandføringen i Lindenborg Å målt ved Møllebro varierer mellem 2 m^3/sek og 12 m^3/sek med enkelte lavpunkter og peaks udenfor intervallet. Q50 er 3,223 m^3/sek, hvilket er omkring 47 % højere end hvad der er målt ved Lindenborg Bro. Den generelt højere vandføring skyldes at Skibsted Å løber ud i Lindenborg Å mellem de to vandføringsstationer, hvorfor oplandet til målestationen ved Møllebro er markant større. Medianminimumvandføringen er 1,649 m^3/sek. Der ses ligeledes en stigning af medianminimumsvandføringen på ca. 37 % hvilket er en lavere stigning end der ses på Q50. Dette forklares af BFI indekset på 0,871 der indikerer at en mindre del af den samlede mængde vand der løber i vandløbet udgøres af Baseflow, altså består den afstrømmende vand af en større mængde regnvand. Det er dog stadig et meget stabilt vandløb med meget lille forskel på medianminimumsvandføring og Q50.

Korrelation af komplette datasæt

C

I dette appendiks korreleres baseflow for hvert vandløb med pejleserierne. Da der ikke er foretaget pejlinger kontinuert, altså på dagsbasis som er tilfældet ved vandføringstidsserierne, foretages en interpolering mellem pejlingerne. Dermed bestemmes en pejling per dag. Herefter beregnes en korrelation mellem disse dataserier, som kan aflæses i tabel C.1.

Lindenborg Å		**Romdrup Å**	
DGU nr.	Korr. (R^2)	DGU nr.	Korr. (R^2)
4.119	-0,29	34.231	0,21
40.306	0,34	34.241	0,23
40.530	0,27	34.507	0,18
41.457	0,32	34.557	0,08
41.461	0,18	34.564	0,09
34.376	0,15	34.571	0,4
34.535	0,25	34.572	0,46
34.539	0,14	34.576	0,24
34.544	0,12	34.578	0,27
34.551	0,22	34.593	0,03
34.1915	0,02	34.598	0,13
		34.600	0,29
		34.614	0,42
		35.100	0,37
		34.1618	0,12

Tabel C.1. Korrelation mellem vandstand og vandføring på baggrund af baseflowet og interpolerede værdier for pejlinger, så der er én værdi dagligt.

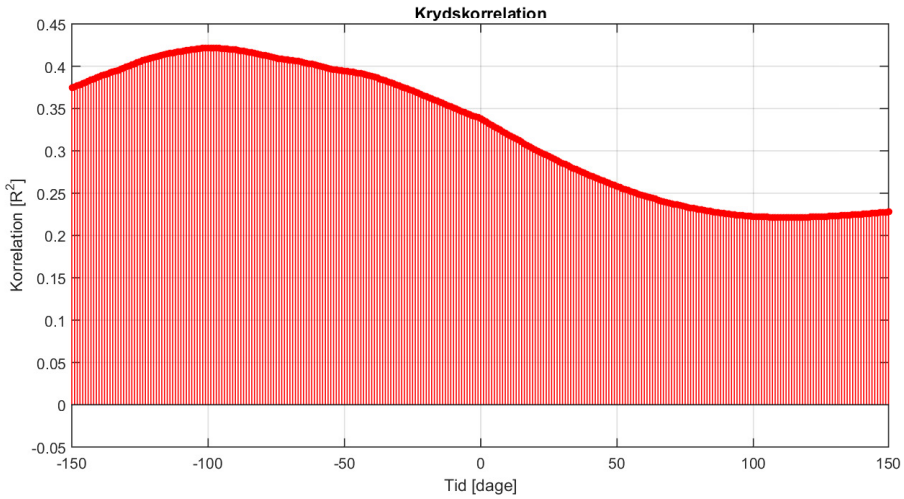
Ud fra tabellen ses det at der er en korrelation mellem vandstand og vandføring i vandløbene, som gennemsnitlig ligger omkring 0,21 for Lindenborg Å, og lidt højere for Romdrup Å på 0,23. Hvor de højeste korrelationer ligger på 0,34 og 0,46 for henholdvis Lindenborg Å og Romdrup Å.

Korrelationerne er lave, og der foretages derfor en krydskorrelationsanalyse, for at bestemme om der er en tidsforskydning ift. sammenhængen mellem vandstand og vandføring. Korrelationer kan aflæses i tabel C.2.

Lindenborg Å			Romdrup Å		
DGU nr.	Korr. (R^2)	Antal dage forskudt	DGU nr.	Korr. (R^2)	Antal dage forskudt
4.119	-0,21	-150	34.231	0,4	-46
40.306	0,42	-100	34.241	0,27	-25
40.530	0,32	-134	34.507	0,3	-56
41.457	0,32	0	34.557	0,08	-30
41.461	0,18	0	34.564	0,31	-85
34.376	0,24	-86	34.571	0,61	-34
34.535	0,36	-90	34.572	0,6	-30
34.539	0,28	-88	34.576	0,48	-39
34.544	0,16	-83	34.578	0,33	-25
34.551	0,39	-93	34.593	0,13	-106
34.1915	0,05	79	34.598	0,26	-30
			34.600	0,41	-31
			34.614	0,57	-28
			35.100	0,44	-22
			34.1618	0,14	-26

Tabel C.2. Krydskorrelation mellem vandstand og vandføring på baggrund af baseflowet og interpolerede værdier for pejlinger, så der er én værdi dagligt.

Den gennemsnitlige korrelation er steget fra 0,21 til 0,27 og fra 0,23 til 0,36 for henholdsvis Lindenborg Å og Romdrup Å. Den maksimale korrelation for Lindenborg Å er 0,42 og for Romdrup Å 0,61. Denne korrelationsanalyse viser at der er en korrelation, men tidsforskydningen mellem flowserierne og pejleserierne viser sig at være omvendt, dvs. at pejlingerne godt kan fremskrives på baggrund af flowserierne, men vandføringen kan ikke fremskrives på baggrund af pejlingerne. Dette fremgår af figur C.1, hvor det ses at den maksimale korrelation ligger ved -100 dage.



Figur C.1. Krydskorrelation mellem flowdata fra Lindenborg Å og pejling 40.306.

Denne korrelationsanalyse forkastes idet pejlingerne og vandføringen er omvendt korreleret ift. fremskrivningen af vandføring. Begrundelsen for denne forskydning er, at der ved regnhændelser hurtigere kan observeres en ændring på vandføringen vandløb i forhold pejlingerne hvor regnvandet først skal sive ned gennem jordlagene. Denne konklusion bekræfter tidligere studiers [Jellesen, 2015] resultater, og der arbejdes videre med en anden metode i hovedrapporten, da denne metode ikke kan bruges til prædiktion af årsminimumsvandføringer.

Kommentarer til korrelationsanalyse

D

I det følgende kommenteres korrelationen for hver enkelt pejleserie, både for Lindenborg Å og Romdrup Å.

D.1 Lindenborg Å

26.4159 - Lindenborg Å

Korrelationen er meget lav frem til april måned, herefter er korrelatioen lidt stigende, men dog meget lave med en maksimal korrelation i juni på 0,25. Denne pejleserie er medtaget idet, korrelationen er stærkere til årsminimumsvandføringen i Romdrup Å.

Boringen er en moniteringsboring og der er ingen aktiv tilladelse tilknyttet.

Generelt er spredningen omkring tendenslinjen i figurene fra januar og februar betydelig, hvorfor der også er beregnet en lav korrelationsfaktor.

34.492 - Lindenborg Å

Der er generelt en stigende tendens, og korrelationerne er høje, over 0,5. Dybden på boringen er 7 mut. Boringen er oprindeligt en vandforsyningsboring, men der er ingen aktive tilladelser.

Det undersøges om der er nogle specielle år som skiller sig ud, ved januar og februar måned. Ved denne pejletidsserie er der et datagrundlag på 26 år, derfor er det kun de år som ligger længst væk fra tendenslinjen som er på figurerne. Årene 1981 og 1985 er repræsenteret i både januar og februar.

34.494 - Lindenborg Å

Der er generelt en stigende tendens, og korrelationerne er høje, over 0,5, og med en maksimal korrelation i april på 0,84. Dybden på boringen er 14,2 mut. Boringen ligger tæt på boring 34.492, se figur 5.1 og det ses også at de to tendenser er sammenfaldende.

De fleste år for januar og februar ligger omkring tendenslinjen. Der ses et lille uforklarligt fald i korrelationen omkring juni måned, hvilket måske kan skyldes at der her bliver pumpet mere vand til markvanding.

34.499 - Lindenborg Å

Der er en stigende tendens frem til marts måned, herefter er korrelationen nogenlunde stabil, dog med et mindre fald i april-maj. Korrelationerne er høje, fra januar måned over 0,6, og med en maksimal korrelation i februar-marts på 0,78. Boringen er oprettet til privat husholdning, men der er ingen aktiv tilladelse. Dybden på boringen er 18,3 mut. Der er ingen gennemgående år som skiller sig ud.

34.502 - Lindenborg Å

Der er en stigende tendens frem til februar måned, herefter er korrelationen nogenlunde stabil, dog med et mindre fald i marts-april og en let stigning fra april-juli. Korrelationerne er høje, fra december over 0,6, og med en maksimal korrelation i juli-august omkring 0,75. Boringen er oprettet som en pejleboring, og dybden på boringen er 41,8 mut.

34.551 - Lindenborg Å

Idet der ved denne boring kun er foretaget to pejlinger pr. år, er der ikke foretaget en interpolation. Der er en kraftig stigning på korrelationen fra februar til september måned, boringen er oprettet som en privat indvindingsboring til husholdning, men der er i dag ingen aktive tilladelser. Boringen er 18 mut, og skiller sig ud fra de andre boringer ved at være placeret længst mod syd. Det er for denne pejleserie ikke muligt at udarbejde en fremskrivningsmodel der er baseret på andre måneder end de der er repræsenteret.

34.571 - Lindenborg Å

Der sker her et fald i korrelation med minimum i marts måned, den højeste korrelation forekommer i december med en korrelation på 0,57. Korrelationen stiger svagt fra marts - juni, dog er korrelationerne relativt lave. Dybden på boringen er 12,5 mut, anvendelsen er ukendt.

34.572 - Lindenborg Å

Der er et fald i korrelationen i marts og april måned, som ved den foregående boring. Boringerne er placeret tæt på hinanden, se figur 5.1, hvilket tyder på at denne tendens kan være område specifik. Dybden på boringen er 4 mut. Anvendelsen er ukendt.

De fleste af korrelationerne er lave dvs. under 0,5. Der er flere år hvor pejlingen afviger meget fra tendenslinjen, så dette er at forvente.

34.1415 - Lindenborg Å

Tendensen ved denne boring er sammenfaldende med de to forrige med et tydelig fald i korrelationen i marts - april måned. Da denne boring er placeret nær de to forrige boringer, se figur 5.1, bekræfter dette endnu engang tesen om at denne tendens kan være område specifik. Der er ikke umiddelbart nogen år der skiller sig ud, men spredningen omkring tendenslinjen er forholdsvist kraftig i både januar og februar, og korrelationen er derefter. Boringen er 71,5 mut, og er oprettet som en vandforsyningsboring. Der er ingen aktive tilladelser.

35.461 - Lindenborg Å

Denne boring er placeret i nærheden af de tre forrige boringer, se figur 5.1, og endnu engang forekommer tendensen med et tydeligt fald i korrelationen i januar - marts. Den højeste korrelation forekommer i juni måned med en maks korrelation på 0,65. Nogle enkelte år skiller sig ud med en forholdsvist stor afstand til tendenslinjen, og korrelationen kunne dermed eventuelt forbedres ved at sortere disse år fra. Boringen er 60 mut og er oprettet som en moniteringsboring. Der er ingen aktive tilladelser til boringen.

D.2 Romdrup Å

26.4159 - Romdrup Å

Korrelationen er meget lav frem til april måned, hvorefter korrelationen stiger brat. Den maksimale korrelation ses i juli måned med en korrelation på 0,64. Det ses tydeligt at alle årene ligger meget tilfældigt for januar og februar, og korrelationen er herefter.

Boringen er en moniteringsboring og der er ingen aktiv tilladelse tilknyttet.

34.492 - Romdrup Å

Der er generelt en stigende tendens, og korrelationerne er lave til middel. Dybden på boringen er 7 mut. Boringen er oprindeligt en vandforsyningsboring, men der er ingen aktive tilladelser.

Ved denne boring er der et datagrundlag på 26 år, derfor er det kun de år som ligger længst væk fra tendenslinjen som er på figurerne. Der er nogle enkelte år som skiller sig ud fra tendensen for januar og februar, det drejer sig om årene 1981, 1983 og 1987. En bedre forklaringsgrad kan opnås hvis disse år sorteres fra ved udfærdigelsen af en regressionsmodel.

34.494 - Romdrup Å

Der er generelt en stigende tendens, og korrelationerne er blandt de højeste for Romdrup, med en maksimal korrelation i juli på 0,67. Dybden på boringen er 14,2 mut. Boringen ligger tæt på boring 34.492, se figur 5.1 og det ses også at de to tendenser er sammenfaldende.

De fleste år for januar og februar ligger omkring tendenslinjen.

34.499 - Romdrup Å

Der er en stigende tendens frem til januar måned, hvorefter korrelationen er stabil frem til april. Herefter er korrelationerne faldende frem til september. Korrelationerne er høje og med en maksimal korrelation i januar-april omkring 0,7. Boringen er oprettet til privat husholdning, men der er ingen aktiv tilladelse. Dybden på boringen er 18,3 mut. Der er ingen gennemgående år som skiller sig ud.

34.502 - Romdrup Å

Der er generelt en stigende tendens frem til juli måned, herefter er korrelationen nogenlunde stabil. Korrelationerne er lave, med en maksimal korrelation i juli-august omkring 0,4. Boringen er oprettet som en pejleboring, og dybden på boringen er 41,8 mut.

34.551 - Romdrup Å

Idet der ved denne boring kun er foretaget to pejlinger pr. år, er der ikke foretaget en interpolation. Der er en kraftig stigning på korrelationen fra februar til september måned, boringen er oprettet som en privat indvindingsboring til husholdning, men der er i dag ingen aktive tilladelser. Boringen er 18 mut, og skiller sig ud fra de andre boringer ved at være placeret længst mod syd. Det er for denne pejleserie ikke muligt at udarbejde en fremskrivningsmodel der er baseret på andre måneder end de der er repræsenteret.

34.571 - Romdrup Å

Der sker her et fald i korrelation med minimum i marts måned, den højeste korrelation på 0,52 forekommer i september. Korrelationen stiger kraftigt fra marts - september. Dybden på boringen er 12,5 mut, anvendelsen er ukendt.

34.572 - Romdrup Å

Der er et fald i korrelationen med minimum i marts måned, som ved den foregående boring. Boringerne er placeret tæt på hinanden, se figur 5.1, hvilket tyder på at denne tendens kan være område specifik. Dybden på boringen er 4 mut. Anvendelsen er ukendt.

De fleste af korrelationerne er lave dvs. under 0,5. Der er flere år hvor pejlingen i januar og februar afviger meget fra tendenslinjen, så dette er at forvente.

34.1415 - Romdrup Å

Korrelationerne er generelt meget lave ved denne boring, men dog stigende fra maj og frem til august hvor den stærkeste korrelation optræder. Der er enkelte år der skiller sig ud, men spredningen omkring tendenslinjen er kraftig i både januar og februar, og korrelationen er derefter. Boringen er 71,5 mut, og er oprettet som en vandforsyningsboring. Der er ingen aktive tilladelser.

35.461 - Romdrup Å

Denne boring er placeret i nærheden af den forrige boring, se figur 5.1, og endnu engang forekommer en sammenlignelig tendens med meget svage korrelationer i oktober - maj. Den højeste korrelation forekommer i august måned med en maks korrelation på 0,62. Nogle enkelte år skiller sig ud med en forholdsvist stor afstand til tendenslinjen, og korrelationen kunne dermed eventuelt forbedres ved at sortere disse år fra. Boringen er 60 mut og er oprettet som en moniteringsboring. Der er ingen aktive tilladelser til boringen.

Regressionsmodel

E

For at være i stand til at udføre den bedst mulige regressionsmodel, er nogle forskellige metoder til valg af den bedste pejlekombination testet. De metoder der ikke er gennemgået i hovedrapporten er beskrevet i dette appendiks.

For at sikre en tilstrækkelig prædiktionsevne af modellen, men samtidig undgå overfitting er det vurderet at modellen skal indeholde data fra tre forskellige pejletidsserier. Med ti forskellige pejletidsserier inkluderet, medfører det 120 forskellige mulige kombinationer, der alle analyseret i regressionsanalysen. Regressionsanalysen er udfærdiget med et Matlab script, se appendiks A.5, hvor der er udfærdiget regressionsmodeller med alle 120 mulige kombinationer, i både november, december, januar og februar. Herefter er der beregnet en forklaringsgrad for alle modeller, ved at korrelere den beregnede vandføring med den observerede vandføring. Denne analyse lægger basis til tabel E.1. I tabellen ses de tre kombinationer med de bedste forklaringsgrader for hhv. Lindenborg- og Romdrup Å i november, december, januar og februar måned. Det observeres i analysen at det ikke nødvendigvis er de samme kombinationer der giver de bedste resultater. Dette vurderes forventeligt, når antallet af kombinationer tages i betragtning, og idet mange af kombinationerne giver en meget høj forklaringsgrad.

De generelt høje forklaringsgrader giver dog anledning til spekulationer i om modellen kan være overfitted. Derfor udføres endnu en regressionsanalyse. For at undgå overfit problematikken, udarbejdes et Matlab script, se appendiks A.5, der i stedet for at beregne årsminimumsvandføring på baggrund af en model med udgangspunkt i hele datasættet, kun benytter data forud for den beregnede årsminimumsvandføring. Ved denne metode er de prædikterede årsminimumsvandføringer ikke påvirket af efterfølgende hændelser. Resultatet af denne analyse kan ses i tabel E.2. En ulempe ved denne metode er, at idet det kræver en betydelig datamængde for at lave en pålidelig model, beregnes der ikke årsminimumsvandføring for de fem første år med tilgænglige pejledata. For pejletidsserier under ti år, vil dette resultere i forklaringsgrader baseret på et utilstrækkeligt datagrundlag (et datagrundlag på syv år vil resultere i to brugbare beregningspunkter til beregning af forklaringsgraden). Dette ses meget tydeligt på signifikansniveauet, der ved få beregningspunkter bliver meget lavt.

Ved sammenligning af forklaringsgraderne bestemt vha. de to forskellige metoder, ses det at forklaringsgradernes størrelse er sammenlignelige, men at signifikansniveauet er lavere i tabel E.2 ift. signifikansniveauet i tabel E.1. Dette skyldes at datagrundlaget, som forklaringsgraden er beregnet på baggrund af, er mindre. Det er bemærkelsesværdigt hvor høj forklaringsgraden er for Lindenborg Å. Det vurderes at dette skyldes at Lindenborg Å i stor grad er grundvandsfødt. For Romdrup Å beregnes generelt nogle lavere forklaringsgrader, hvilket kan skyldes vandløbets følsomhed for nedbørshændelser,

hvilke ikke er mulige at inkludere i prædiktionsmodellen på nuværende tidspunkt. Ved nærmere analyse af resultaterne er det tydeligt at graden af tilfældighed er høj ved brug af denne metode, idet kombinationen af 120 beregnede modeller, og få målepunkter (tre - fem målepunkter), gør tilfældigheden for stor. Kombinationen af en god sammenhæng mellem årsminimumsvandføring og pejledata, samt det store antal modeller betyder at de beregnede modeller både viser stor grad af signifikans og høj forklaringsevne, men uden at den reelle prædiktionsevne er i top.

Tabel E.1 viser de bedste opnåede forklaringsgrader, ved brug af hele datasættet til validering. Tabellen viser de tre bedste kombinationer. Tabel E.2 viser de bedste opnåede forklaringsgrader, ved ren fremskrivning. Dvs. der er ikke brugt data til fremskrivningsmodellen der er nyere end det år der fremskrives i.

Lindenborg					**Romdrup**				
November									
Kombination			**R^2**	**p**	**Kombination**			**R^2**	**p**
34.494	34.499	34.572	0,96	$1,99 \cdot 10^{-7}$	26.4159	34.492	35.461	0,76	$1,07 \cdot 10^{-2}$
34.499	34.502	34.572	0,96	$2,01 \cdot 10^{-7}$	26.4159	34.492	34.1415	0,72	$1,62 \cdot 10^{-2}$
34.499	34.571	34.572	0,95	$2,51 \cdot 10^{-7}$	26.4159	34.492	34.571	0,69	$5,71 \cdot 10^{-3}$
December									
Kombination			**R^2**	**p**	**Kombination**			**R^2**	**p**
34.499	34.502	34.572	0,98	$1,53 \cdot 10^{-8}$	34.492	34.494	34.572	0,76	$5,36 \cdot 10^{-5}$
34.494	34.499	34.572	0,97	$1,65 \cdot 10^{-8}$	34.492	34.494	34.571	0,75	$5,63 \cdot 10^{-5}$
34.492	34.499	34.572	0,97	$2,45 \cdot 10^{-8}$	34.492	34.499	34.572	0,75	$1,31 \cdot 10^{-4}$
Januar									
Kombination			**R^2**	**p**	**Kombination**			**R^2**	**p**
34.572	34.1415	35.461	0,97	$1,39 \cdot 10^{-6}$	34.494	34.499	34.571	0,75	$1,17 \cdot 10^{-4}$
34.571	34.1415	35.461	0,96	$3,75 \cdot 10^{-6}$	34.494	34.499	34.572	0,75	$1,34 \cdot 10^{-4}$
34.492	34.1415	35.461	0,93	$2,30 \cdot 10^{-5}$	34.492	34.499	34.502	0,75	$1,38 \cdot 10^{-4}$
Februar									
Kombination			**R^2**	**p**	**Kombination**			**R^2**	**p**
34.494	34.571	34.572	0,85	$2,13 \cdot 10^{-5}$	34.499	34.571	34.572	0,83	$1,61 \cdot 10^{-5}$
34.492	34.499	34.502	0,83	$9,23 \cdot 10^{-5}$	34.494	34.499	34.572	0,82	$2,33 \cdot 10^{-5}$
34.492	34.499	34.572	0,82	$1,28 \cdot 10^{-4}$	34.499	34.502	34.572	0,80	$3,25 \cdot 10^{-5}$

Tabel E.1. Forklaringsgraden ved forskellige kombinationer i regressionsmodellen.

Lindenborg					Romdrup				
November									
Kombination			$\mathbf{R^2}$	**p**	**Kombination**			$\mathbf{R^2}$	**p**
26.4159	34.492	34.571	0,99	$3,73 \cdot 10^{-3}$	34.572	34.1415	35.461	0,72	$1,53 \cdot 10^{-1}$
26.4159	34.492	34.572	0,89	$5,74 \cdot 10^{-2}$	34.502	34.571	34.1415	0,63	$2,09 \cdot 10^{-1}$
34.492	34.499	34.572	0,86	$7,32 \cdot 10^{-3}$	34.571	34.572	34.1415	0,62	$2,10 \cdot 10^{-1}$
December									
Kombination			$\mathbf{R^2}$	**p**	**Kombination**			$\mathbf{R^2}$	**p**
34.499	34.502	34.572	0,99	$3,51 \cdot 10^{-7}$	26.4159	34.492	34.502	0,89	$4,8 \cdot 10^{-3}$
34.499	34.571	34.572	0,99	$6,49 \cdot 10^{-5}$	34.502	34.571	34.461	0,89	$5,8 \cdot 10^{-2}$
34.492	34.499	34.572	0,98	$1,60 \cdot 10^{-4}$	34.492	34.502	34.1415	0,86	$7,0 \cdot 10^{-2}$
Januar									
Kombination			$\mathbf{R^2}$	**p**	**Kombination**			$\mathbf{R^2}$	**p**
34.571	34.1415	35.461	0,97	$1,70 \cdot 10^{-2}$	34.492	34.502	34.1415	0,75	$1,37 \cdot 10^{-1}$
34.572	34.1415	35.461	0,95	$2,65 \cdot 10^{-2}$	34.492	34.502	35.461	0,73	$1,47 \cdot 10^{-1}$
34.492	34.1415	35.461	0,76	$1,30 \cdot 10^{-1}$	26.4159	34.492	34.572	0,64	$5,75 \cdot 10^{-2}$
Februar									
Kombination			$\mathbf{R^2}$	**p**	**Kombination**			$\mathbf{R^2}$	**p**
34.492	34.499	34.571	0,76	$2,38 \cdot 10^{-2}$	34.492	34.1415	35.461	0,97	$1,44 \cdot 10^{-2}$
34.492	34.499	34.572	0,74	$2,71 \cdot 10^{-2}$	34.502	34.1415	35.461	0,94	$3,13 \cdot 10^{-2}$
34.494	34.499	34.572	0,74	$2,79 \cdot 10^{-2}$	34.492	34.572	35.461	0,83	$9,91 \cdot 10^{-2}$

Tabel E.2. Forklaringsgrad ved forskellige kombinationer af pejleserier ved fremskrivning af uafhængige årsminimumsvandføringer.

Den metode der endeligt er anvendt til at bestemme den bedste kombination af pejleserier, er beskrevet i hovedrapporten. Det vurderes dog at en model baseret på nyere data bedre kan tage højde for ændrede betingelser og klimaforandringer, og dermed bedre er i stand til at fremskrive årsminimumsvandføringer i nyere tid. Det kan derfor anbefales, i tilfælde af at en mere "smart"metode ønskes anvendt, at en ny model udarbejdes løbende med inkludering at de nyeste data. En sådan model kan udføres tilsvarende metoden beskrevet i nærværende bilag, og det vurderes at en sådan model vil være i stand til at levere mere præcise resultater, med forbehold for at en tilstrækkelig mængde historisk data er tilgængelig.

Nedbørsdata

F

I tabel F.1 er årsnedbøren hvert år fra 1980 - 2013 listet op sammen med årsminimumsvandføring, hvilken måned årsminimumsvandføringen optræder samt mængden af nedbør der falder fra februar og frem til denne måned.

Den første tabel F.1 viser nøgletal for Lindenborg Å, og den følgende tabel F.2 viser samme nøgletal for Romdrup Å.

År	Årsnedbør [mm]	Årsmin [m^3/s]	Måned	Forårsnedbør [mm]
1980	659	1,449	7	285
1981	752	1,999	9	431
1982	605	1,81	8	359
1983	736	1,804	8	398
1984	599	1,859	8	252
1985	677	1,974	6	264
1986	536	1,825	7	217
1987	655	1,716	8	421
1988	711	1,893	8	459
1989	495	1,634	9	243
1990	826	1,368	8	248
1991	635	1,683	9	302
1992	752	1,555	8	402
1993	792	1,46	7	229
1994	994	1,685	7	302
1995	761	1,803	7	341
1996	603	1,426	8	238
1997	709	1,519	8	327
1998	1015	1,597	8	509
1999	1037	2,073	11	531
2000	933	1,884	8	376
2001	856	1,718	8	392
2002	1024	1,978	6	482
2003	763	1,711	9	454
2004	911	1,601	6	339
2005	760	1,649	8	415
2006	1014	1,686	7	329
2007	943	1,912	9	479
2008	809	1,975	6	340
2009	896	1,807	9	425
2010	598	1,73	6	309
2011	702	1,638	9	656
2012	700	1,724	8	511
2013	562	1,447	8	308

Tabel F.1. Årsnedbør, årsminimumsvandføring samt hvilken måned den indtræffer, og nedbøren fra årsminimumsvandføringen indtræffer i Lindenborg Å og fem måneder tilbage.

År	Årsnedbør [mm]	Årsmin $[m^3/s]$	Måned	Forårsnedbør [mm]
1980	659	0,024	8	375
1981	752	0,058	8	465
1982	605	0,035	8	359
1983	736	0,05	7	395
1984	599	0,026	8	253
1985	677	0,03	8	388
1986	536	0,029	10	334
1987	655	0,059	7	401
1988	711	0,042	9	467
1989	495	0,031	8	289
1990	826	0,02	7	313
1991	635	0,026	8	285
1992	752	0,029	8	402
1993	792	0,022	8	274
1994	994	0,036	8	414
1995	761	0,026	8	279
1996	603	0,018	8	238
1997	709	0,033	10	380
1998	1015	0,077	6	452
1999	1037	0,097	8	574
2000	933	0,051	7	409
2001	856	0,038	7	371
2002	1024	0,091	6	482
2003	763	0,069	10	419
2004	911	0,022	7	332
2005	760	0,07	10	414
2006	1013	0,062	1	347
2007	943	0,072	6	528

Tabel F.2. Årsnedbør, årsminimumsvandføring samt hvilken måned den indtræffer, og nedbøren fra årsminimumsvandføringen indtræffer i Romdrup Å og fem måneder tilbage.

I tabel F.3 er nedbør for alle måneder listet op.

År	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
1980	14	14	23	13	16	103	68	89	55	98	81	78
1981	57	33	79	4	70	116	67	52	51	81	120	22
1982	32	8	41	15	83	53	31	78	56	92	45	73
1983	62	14	73	66	128	23	25	17	120	99	37	49
1984	91	4	30	10	27	67	25	51	52	126	59	37
1985	20	15	42	64	22	57	58	81	93	32	58	128
1986	61	0	60	22	49	22	29	93	30	55	56	54
1987	12	32	41	30	18	92	120	49	55	96	69	40
1988	112	83	59	27	34	56	121	86	65	52	26	48
1989	15	68	67	32	35	38	20	49	29	68	18	56
1990	105	122	42	38	25	48	39	57	122	89	49	87
1991	64	48	42	54	27	107	28	28	58	57	85	35
1992	45	40	85	105	27	2	48	136	56	74	98	38
1993	112	27	26	22	22	31	100	73	112	80	50	137
1994	122	55	108	34	21	67	17	168	219	50	55	78
1995	111	78	65	47	62	58	31	16	137	56	74	28
1996	11	46	10	7	77	33	50	61	52	92	115	48
1997	15	103	34	40	68	72	66	49	58	68	65	73
1998	70	61	56	92	41	132	109	78	72	180	45	78
1999	96	51	96	61	64	172	61	121	73	65	40	137
2000	68	77	77	64	63	82	46	44	88	115	94	97
2001	60	51	48	105	49	91	27	72	146	79	55	71
2002	104	136	54	24	44	120	125	117	50	110	95	46
2003	53	16	26	83	91	90	108	32	49	48	77	90
2004	113	28	54	45	43	56	106	121	66	145	64	65
2005	78	59	60	25	80	103	94	53	39	46	72	51
2006	54	64	48	56	75	50	36	201	58	133	110	122
2007	129	165	44	29	58	104	132	50	107	22	43	61
2008	107	41	86	47	6	53	62	154	64	84	70	22
2009	56	34	67	18	56	85	110	115	42	73	135	102
2010	66	85	34	19	55	46	75	95	66	96	146	49

Tabel F.3. Alle nedbørsmængder er i mm.

F.1 Regressionsmodel med nedbør

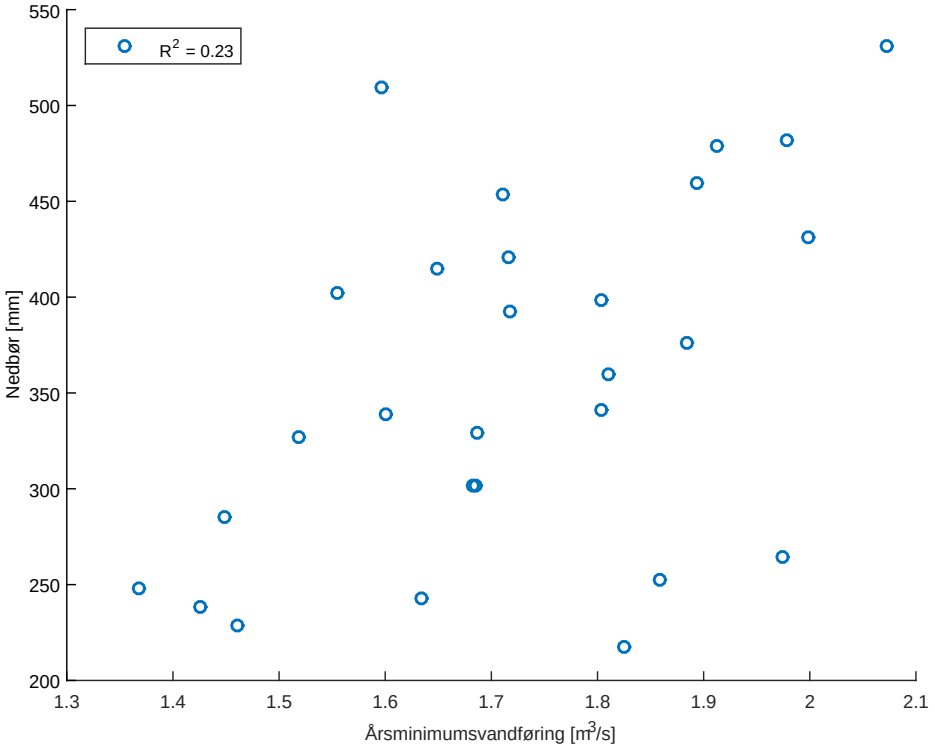
Som det fremgår af tabel F.4, er der ikke en stor forskel på de prædikterede værdier med og uden nedbør. Der er heller ikke en entydig tendens til, at de år, nævnt under nedbør '88, '91, '93 og '95, er mere præcise ved anvendelse af en prædiktionsmodel med nedbør.

År	Observeret	Prædikteret uden regn	Prædikteret med regn	Forskel uden	Forskel med
1987	0,059	0,039	0,041	0,020	0,018
1988	0,042	0,046	0,050	-0,004	-0,008
1989	0,031	0,035	0,029	-0,004	0,002
1990	0,02	0,023	0,026	-0,003	-0,006
1991	0,026	0,038	0,032	-0,012	-0,006
1992	0,029	0,034	0,036	-0,005	-0,007
1993	0,022	0,021	0,021	0,001	0,001
1994	0,036	0,030	0,028	0,006	0,008
1995	0,026	0,026	0,027	0,000	-0,001

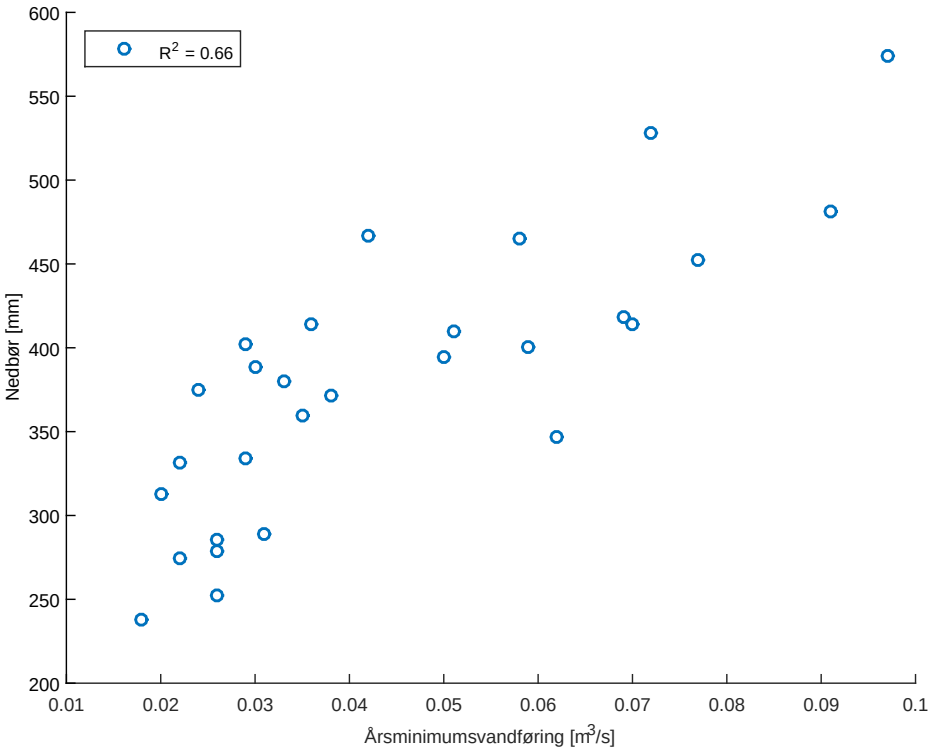
Tabel F.4. Sammenligning af prædiktionsmodel uden nedbør med prædiktionsmodel hvor nedbør er inkluderet, for Romdrup Å med kombinationen 34.502, 34.1415 og 35.461.

F.2 Undersøgelse af sammenhæng mellem årsminimumsvandføring og nedbør vha. scatterplots

Det undersøges vha. scatterplots om der er en tydelig sammenhæng mellem årsminimumsvandføring og nedbøren. Det er beskrevet i det tidligere afsnit at der specielt ses en tydelig sammenhæng ved benyttelse af nedbør fra fem måneder før og til årsminimumshændelsen indtræffer. Scatterplots ses på figur F.1 for Lindenborg, og F.2 for Romdrup.



Figur F.1. Scatterplot der illustrerer sammenhængen mellem årsminimumsvandføring og nedbør fem måneder før årsminimumshændelsen indtræffer, her for Lindenborg Å.



Figur F.2. Scatterplot der illustrerer sammenhængen mellem årsminimumsvandføring og nedbør fem måneder før årsminimumshændelsen indtræffer, her for Romdrup Å.

Det er tydeligt at sammenhængen mellem årsminimumsvandføring og nedbør der falder fem måneder før og til årsminimumshændelsen indtræffer er negligerbar for Lindenborg Å, hvor scatterpunkterne er meget spredte. Dette resultat er forventeligt idet Lindenborg Å i høj grad er grundvandsfødt som forklaret i kapitel 4. Der er en tydeligere sammenhæng, imellem årsminimumsvandføringen og nedbør der falder fra fem måneder før og til årsminimumsvandføringen indtræffer, ved Romdrup Å. Dette er ligesom for Lindenborg Å et forventligt resultat idet Romdrup Å i mindre grad er grundvandsfødt og dermed mere følsom overfor regnhændelser. Det skal noteres at denne sammenhæng er tydeligst når nedbøren for fem måneder før og til årsminimumshændelsen indtræffer tages i betragtning. Analyseres enkelte måneders, eller kortere perioders nedbør bliver sammenhængen negligerbar. Det kan konkluderes, at nedbøren spiller en rolle iht. årsminimumsvandføring, i alle tilfælde når nedbør betragtes fra fem måneder før og til årsminimumshændelsen indtræffer.

Test af modelfit

G

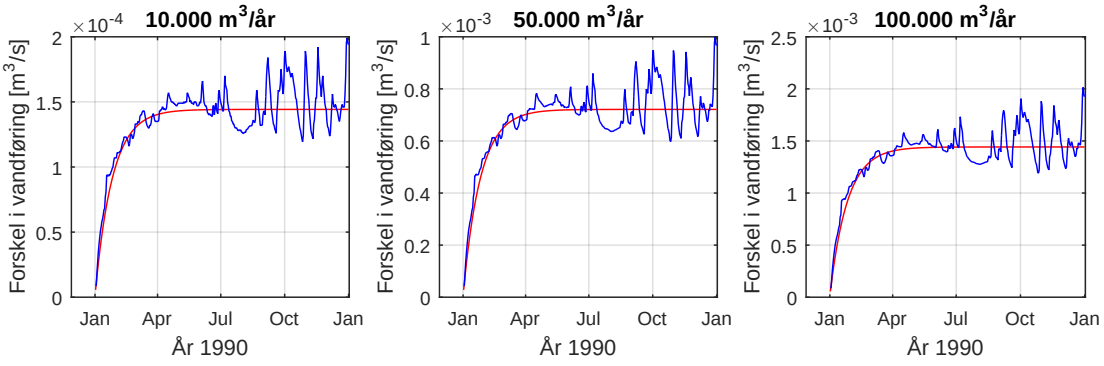
For at teste om modelfits er præcise uafhængigt af hvor meget grundvand der oppumpes, udføres en test hvor modelfit med forskellige indvinding sammenlignes med tilsvarende modelleret i Mike SHE.

Analyse af forskellige indvindinger for Klarup Vandværk

Der tages udgangspunkt i Klarup Vandværk, og der simuleres med nogle forskellige konstante indvinding. For at finde ud af om indvinding har nogen betydning for, hvor lang tid der går før ændringen indtræffer. De nye scenarier der simuleres er med konstante indvinding på:

- 10.000
- 50.000
- 100.000

På figur G.1 er der foretaget et modelfit for de tre scenarier vha. formel 10.1.



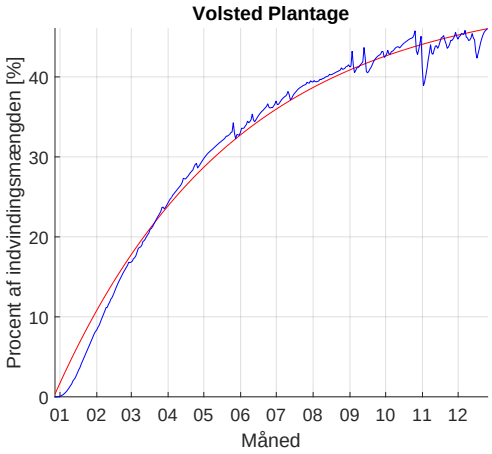
Figur G.1. Indvindingsmængder 10.000, 50.000 og 100.000.

I figur G.1 er parametrene i modelfittet for alle tre scenarier det samme, det er kun indvinding som ændres. Det ses at det er omkring april, hvor påvirkningen indstiller sig og bliver konstant. Det betyder at indvinding ikke har betydning for hukommelsen. Påvirklingen følger, som forventet direkte indvindingen. Dvs. den maksimale påvirkning ved en indvinding på 10.000 m^3/år er 1,5 l/s, og ved en indvinding på 50.000 m^3/år er påvirkningen 5 gange større osv..

Modelfits til Hølbækken, Indkildestrømmen, Landbækken og Vårst Hovedgrøft

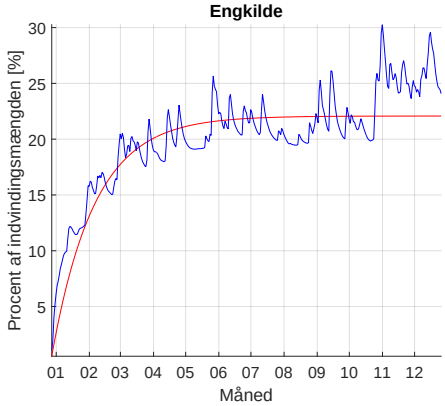
H

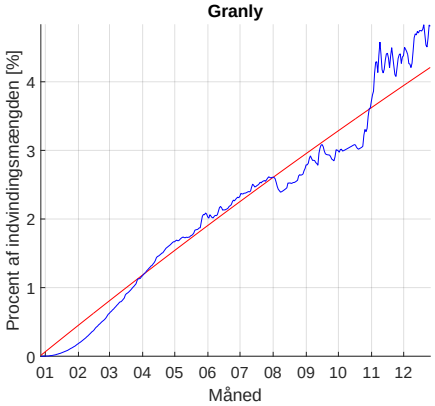
H.1 Hølbækken

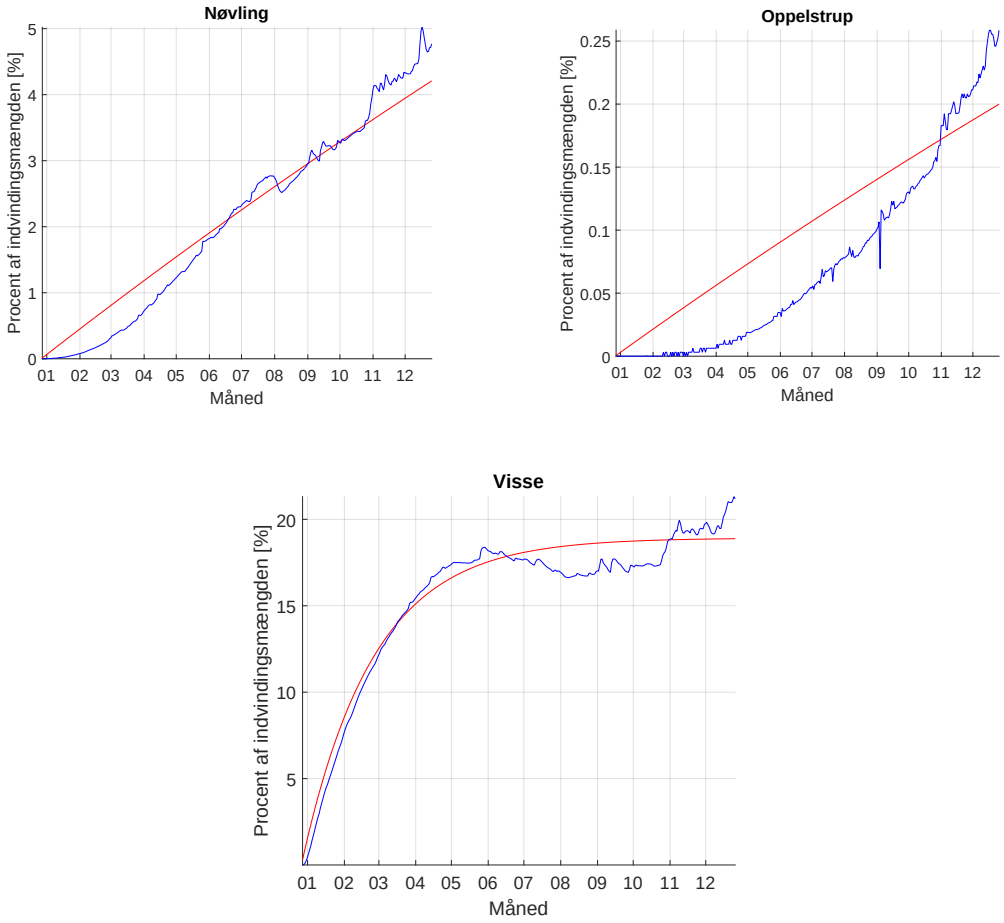


Figur H.1. Påvirkning af vandføringen i Hølbækken fra den nye kildeplads i Volsted Plantage, efter ét års indvinding. Y-aksen indikerer hvor stor en procentdel af indvindingen der er slået igennem på vandføringen i Hølbækken.

H.2 Indkildestrømmen

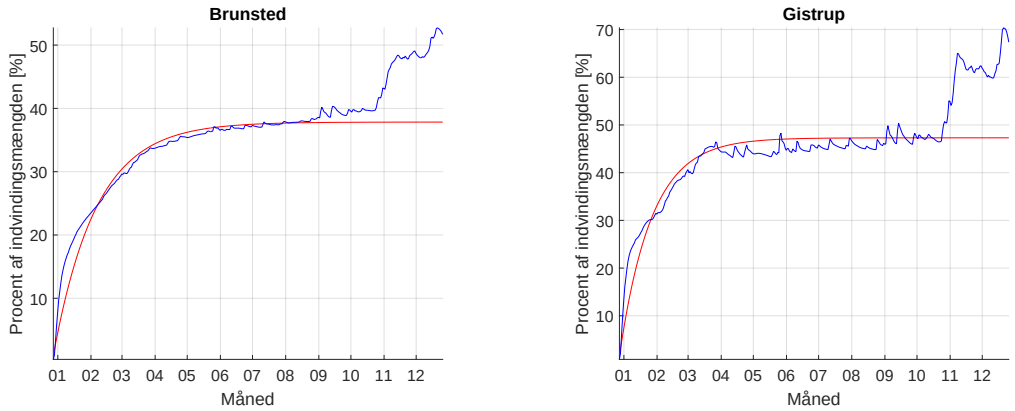


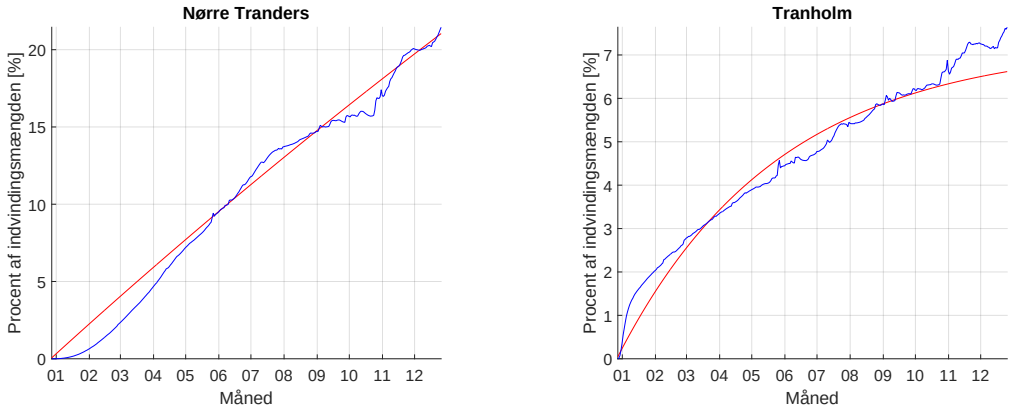




Figur H.2. Påvirkning af vandføringen i Indkildestrømmen efter ét års indvinding fra forskellige kildepladser i oplandet. Y-aksen indikerer hvor stor en procentdel af indvindingen der er slået igennem på vandføringen i Indkildestrømmen.

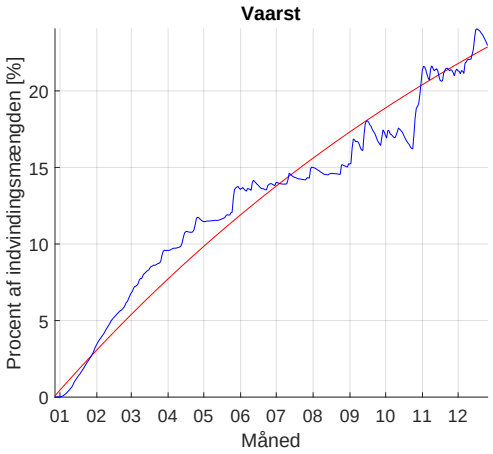
H.3 Indkildestrømmen





Figur H.3. Påvirkning af vandføringen i Landbækken fra forskellige kildepladser i oplandet, efter ét års indvinding. Y-aksen indikerer hvor stor en procentdel af indvindingen der er slået igennem på vandføringen i Landbækken.

H.4 Vårst Hovedgrøft



Figur H.4. Påvirkning af vandføringen i Vårst Hovedgrøft fra kildepladsen i Vårst, efter ét års indvinding. Y-aksen indikerer hvor stor en procentdel af indvindingen der er slået igennem på vandføringen i Vårst Hovedgrøft.