



Hedeselskabet 2017

Forudsætninger og data ved vand-spejlsberegninger i vandløb

FAGLIG UDREDNING TIL HEDESELSKABETS MEDLEMSUDVALG

Hedeselskabet 2017

Forudsætninger og data ved vand-spejlsberegninger i vandløb

**Udgivet med
støtte fra**

Hedeselskabet
Klostermarken 12
Postboks 91
8800 Viborg
Att.: Vibeke Højen

Forfatter

Orbicon A/S
Jens Juuls Vej 16
8260 Viby J

Projektnummer

3691400149

Projektleder

Bjarne Moeslund

**Analyser,
beregninger
og tekst**

Klaus Schlünsen & Inger Klint Jensen & Bjarne Moeslund

Kvalitetssikring

Lars Bo Christensen

Revisionsnr.

Endelig udgave

Godkendt af

Henrik Vest Sørensen

Udgivet

31-10-2017

INDHOLDSFORTEGNELSE

IKKE-TEKNISK RESUMÉ	7
1. INDLEDNING	11
2. REDEGØRELSENS EMNEVALG	13
3. HYDRAULISKE BEREKNINGFORMLER	15
3.1. Chézy's formel	15
3.2. Coldings formel	16
3.3. Ganguillet og Kutter	16
3.4. Mannings formel	17
3.5. Brugen af formlerne	18
4. PARAMETRENE I VANDSPEJLSBEREGNINGER	21
4.1. Hydraulisk radius vs. modstandsradius	22
4.1.1 Konklusion	26
4.2. Manningformlens parametre	27
4.2.1 Opmålingsdata	27
4.2.2 Vandføring	28
4.2.3 Manningtallet	30
4.2.4 Konklusion	34
5. VANDFØRINGSEVNEBESTEMTE REGULATIVER	36
5.1. Q/H-regulativer	37
5.2. Teoretisk skikkelse	42
5.2.1 Definition	43
5.2.2 Udmøntning af teoretisk skikkelse i praksis	44
5.3. Teoretisk skikkelse – en udbredt men ofte kritiseret regulativtype	47
5.3.1 "Regulativet sikrer ikke i tilstrækkelig grad mod oversvømmelser"	47
5.3.2 "De udførte beregninger afspejler ikke virkeligheden" ...	48
5.3.3 "Der regnes på forkerte Manningtal"	50
5.3.4 "Skepsis i forhold til beregninger"	50

5.3.5	"Der bør regnes på forskellige Manningtal i faktiske og teoretiske skikkelse"	51
5.3.6	"Vandspejlsberegninger tager ikke højde for enkelttab i et varieret profil"	53
5.3.7	Sammenfatning af fordele og ulemper ved regulativtypen teoretisk skikkelse	54

6. VIRKEMIDLER I VANDLØB OG FREMTIDIG/ÆNDRET VEDLIGEHOLDELSE.....56

6.1.	Beregningseksempler	56
6.1.1	Betydningen af vandløbets størrelse og bundhældning.....	57
6.1.1.1.	Indsnævring.....	57
6.1.1.2.	Bundhævninger på delstrækninger	58
6.1.1.3.	Bundhævninger i hele vandløbet.....	58
6.1.1.4.	Grødeskæring.....	59
6.1.1.5.	Konklusion	60
6.2.	Feltforsøg i Kimmerslev Møllebæk	60
6.2.1	Udlægning af store sten	61
6.2.2	Trinvis indsnævring af profilet	62
6.2.3	Bundhævning over en trinvis længere strækning.....	65
6.2.4	Mulige årsager til afvigelser mellem beregnede og faktiske vandstandsændringer	68
6.2.5	Konklusion	68
6.3.	Grødeskæring i Fladmose Å.....	69
6.3.1	Vurdering	73

7. KLIMAFORANDRINGER74

7.1.	Allerede stedsfundne klimaforandringer	74
7.1.	Fremtidige klimaforandringer	76
7.2.	Vandløbs størrelse i forhold til vandføringens størrelse	79
7.3.	Foranstaltninger til klimatilpasning af vandløb.....	81
7.4.	Konklusion	83

8. REGNVAND FRA BEFÆSTEDE AREALER.....84

8.1.	Konklusion	87
------	------------------	----

9. REFERENCER	88
---------------------	----

10.EFTERSKRIFT OG ANBEFALINGER	90
--------------------------------------	----

BILAGSFORTEGNELSE

- Bilag 1. Resultater af beregninger af forskellige fysiske forandringer i vandløb af forskellig størrelse og med forskellig bundhældning.
- Bilag 2. Rapport om feltforsøg med fysiske indgreb i Kimmerslev Møllebæk november 2015.

IKKE-TEKNISK RESUMÉ

Denne faglige redegørelse er blevet udarbejdet af en arbejdsgruppe i Orbicon med økonomisk støtte fra Hedeselskabet. Bevillingen er givet med sigte på at skabe en bedre fælles forståelse af, hvordan og på hvilket datagrundlag man foretager beregninger vandstande og vandspejl i vandløb, og med sigte på at tydeliggøre de muligheder og begrænsninger, sådanne beregninger er behæftet med. Bevillingen fra Hedeselskabet blev givet med følgende begrundelse: *"Brugen af Manningformlen er helt grundlæggende for forståelsen af vandets bevægelse og for vandløbenes fysik, som det præsenteres i vandløbsregulativerne. Det er netop vurderingen af Manningtallet, der ofte skaber debatten mellem interessenterne."*

Der blev efter ønske fra Hedeselskabet forud for arbejdets igangsætning nedsat en følgegruppe med repræsentanter fra både myndighedssiden (kommuner og Miljøstyrelsen), brugersiden (landbruget) og forskningsverdenen. Følgegruppen har spillet en meget vigtig og aktiv rolle, indledningsvis ved udmøntningen af den overordnede opgavebeskrivelse i konkrete og afgrænsede emner, og undervejs med drøftelse og kommentering af arbejdet og udkastene til redegørelsen. Følgegruppens deltagelse har således været med til at give redegørelsen et relevant indhold og den rette vinkling i forhold til de problemstillinger, der er af interesse for modtagergruppen(-erne).

Det skal indledningsvis pointeres, at der er tale om en faglig redegørelse, som - trods bestræbelser på at formidle emnerne til en bredere kreds - forudsætter en betydelig indsigt i vandløbsadministration og vandløbshydraulik.

Redegørelsen er søgt opbygget på en sådan måde, at den i behandlingen af de besluttede emner leder frem mod besvarelsen af de hovedspørgsmål om forudsætninger og databehov for vandspejlsberegninger i vandløb, der udgør Hedeselskabets begrundelse for at støtte arbejdet med udredningen.

Kapitel 3 indeholder en redegørelse for de formler, der op gennem tiden er blevet benyttet til vandspejlsberegninger i vandløb. Denne "historiske" gennemgang er udarbejdet for at vise, at de beregningsmæssige forudsætninger for vandspejlsberegninger tilbage i tiden ikke var de samme som de beregningsmæssige forudsætninger, der gælder for beregninger i dag ved benyttelse af Mannings formel. Kapitlets indhold rummer væsentlige dele af grundlaget for argumentationen og beskrivelserne i flere af de efterfølgende kapitler.

Kapitel 4 går i dybden med de beregningsmæssige forudsætninger – både muligheder og begrænsninger - der knytter sig til de enkelte parametre i Manningformlen. Redegørelsen sætter fokus på betydningen af at benytte hydraulisk radius henholdsvis modstandsradius, et emne af stor betydning i forhold til vandspejlsberegninger generelt, og specielt i forhold til regulativer af typen "teoretisk skikkelse". Kapitlet giver derudover en bredere redegørelse for de krav, muligheder og begrænsninger, der knytter sig til de data, der ligger til grund for beregningerne. Indholdet i kapitel 4 er læsemæssigt tungt og fagligt vanskeligt tilgængeligt, men hovedkonklusionen i kapitlet er i korthed, at den vigtigste forudsætning for at få retvisende resultater af vandspejlsberegninger er, at der

benyttes gode og retvisende input data, det vil sige gode vandføringsdata og gode opmålingsdata.

Selv med gode input data om vandføring og dimensioner og fald mv. må det alligevel konstateres, at resultaterne af vandspejlsberegninger altid vil være behæftet med en vis usikkerhed, særligt fordi fastlæggelsen af nøgleparameteren – Manningtallet – er vanskelig og altid behæftet med usikkerhed. Denne usikkerhed skyldes dels, at Manningtallet ikke kan måles direkte med et instrument, men må skønnes eller beregnes, og dels at Manningtallet i de fleste vandløb udviser stor tidsmæssig variation, både inden for de enkelte år og mellem årene, samt stor geografisk variation. I kapitel 6 er der omtalt en række feltforsøg, der giver et indtryk af usikkerhedens størrelse og en redegørelse for de faktorer, der er medvirkende årsager til usikkerheden.

Kapitel 5 indeholder en redegørelse for regulativer, der opererer med krav til vandføringsevnen, med særligt fokus på regulativtypen "teoretisk skikkelse". Kapitlet gør rede for formålet med denne regulativtype og diskuterer dels formålet med regulativtypen og dels de kritikpunkter, der er fremført mod måden, hvorpå vandføringsevnen kontrolleres i vandløb, der administreres efter regulativer af typen teoretisk skikkelse. Teoretisk skikkelse er kort fortalt en regulativtype, der er "opfundet" for at muliggøre den fysiske variation og formudvikling, der er nødvendig for at kunne opnå opfyldelse af de besluttede miljømålsætninger. Regulativtypen opererer som reference med vandføringsevnen i et specificeret geometrisk profil og opererer ved kontrollen af vandføringsevnen med den forudsætning, at vandløb må antage en vilkårlig profilform, så længe vandføringsevnen som minimum svarer til vandføringsevnen i det specificerede geometriske profil. Denne forudsætning er baseret på en antagelse om, at profilformen er uden betydning for den beregnede vandføringsevne, og at denne derfor beregnes ved brug af ét og samme Manningtal i det geometriske profil og i det opmålte profil.

Det er denne antagelse og praksis med at benytte ét og samme Manningtal i det geometriske og i det opmålte profil, der er baggrunden for at behandle teoretisk skikkelse så indgående i redegørelsen. Antagelsen om, at profilformen (kun formen, ikke dimensionerne) er uden betydning for vandføringsevnen, har endvidere affødt mange diskussioner i følgegruppen om, hvorvidt vandløbenes fysiske form og variation har en betydende indflydelse på strømningsmodstanden og dermed på vandføringsevnen.

Det har ikke været muligt inden for projektets rammer at komme så langt som ønsket i besvarelsen af spørgsmålet om, i hvilken grad retlinede, glatte og ensartede vandløb påfører det strømmende vand betydende mindre strømningsmodstand end fysisk og formmæssigt varierede vandløb. Selvom udenlandsk litteratur både argumenterer for, at fysisk varierede vandløb har en større strømningsmodstand end retlinede og ensartede vandløb, og anfører intervaller med talværdier for Manningtallets formrelaterede delkomponenter, så har det ikke været muligt i dette projekt at kvantificere formruheden og derigennem gøre den operationel i forbindelse med vandspejlsberegninger i danske vandløb. Det gælder både relation til regulativer af typen teoretisk skikkelse og i relation til projekter til forbedring af den fysiske vandløbskvalitet.

Kapitel 6 indeholder indledningsvis en række beregningsmæssige eksemplificeringer af, hvordan variationer af inputdata påvirker resultaterne af vandspejlsberegninger i vandløb i forbindelse med formændringer, eksempelvis i forbindelse med vandløbsrestaureringer. Det drejer sig bl.a. om betydningen af vandløbenes faldforhold og størrelse for, hvordan forskellige foranstaltninger i vandløbene påvirker vandstanden.

Kapitlet giver en kortfattet beskrivelse af de vigtigste generelle resultater af de talmæssigt meget omfattende beregninger, der er vist i redegørelsens bilag 1. Hovedkonklusionen af de gennemførte beregninger er, at jo større forandringer og jo længere strækninger med forandringer, desto større vandstandsstigninger samt at jo mindre bundhældning (fald), desto længere opstrøms påvirkes vandstanden.

Undervejs i arbejdet med redegørelsen blev der, takket være en ekstra bevilling fra Hedeselskabet, mulighed for at gennemføre feltforsøg med forskellige fysiske foranstaltninger i vandløb.

Feltforsøgene blev gennemført i Kimmerslev Møllebæk, hvor det var muligt at måle effekterne af forskellige foranstaltninger ved konstant vandføring, og hvor det på baggrund af opmålinger af vandløbet før, under og efter de gennemførte foranstaltninger var muligt efterfølgende at beregne de resulterende vandstande og derefter sammenligne dem med de målte vandstande. Kapitel 6 indeholder en opsummering af feltforsøgenes resultater, mens Bilag 2 indeholder en mere omfattende redegørelse for feltforsøget.

De gennemførte feltforsøg har indholdsmæssigt stor lighed med de mange projekter, der er gennemført og bliver gennemført til forbedring af den fysiske vandløbskvalitet rundt om i landet, men de adskiller sig på ét afgørende punkt fra disse, nemlig overvågningen af de vandstandsmæssige effekter. Overvågningen har gjort det muligt at sammenligne de faktiske vandstandsændringer med de vandstandsændringer, der kan beregnes på grundlag af et detaljeret kendskab til (opmåling af) de gennemførte foranstaltninger.

Sammenligningerne af målte og beregnede vandstande viser, at der i de gennemførte forsøg var en vis afvigelse, forstået på den måde, at de beregnede vandstande i flertallet af målepunkterne lå nogle få centimeter lavere end de faktisk målte vandstande. Det er følgegruppens vurdering, at eftersom forsøgene er gennemført med en meget høj måleintensitet, så må afvigelserne ses som et vilkår ved den type beregninger, og det er følgegruppens holdning, at det er vigtigere og mere nyttigt i sådanne projekter at informere om, at der er en vis usikkerhed på beregnede vandstande, end det er at øge måleintensiteten uden vished for, at det mindsker usikkerheden på beregningerne.

Kapitel 6 afsluttes med en redegørelse for resultaterne af et grødeskæringsforsøg, som Slagelse Kommune gennemførte, med sigte på at kunne belyse effekterne af trinvis mere omfattende grødeskæring på vandstanden. Forsøget gav desværre ikke helt den ønskede information, idet vandføringen på tidspunktet for grødeskæringen var for lille til at give et retvisende billede.

Kapitel 7 indeholder en redegørelse for de forventelige effekter af klimaforandringerne på afstrømningsforholdene i vandløb. På denne baggrund diskuteres og vurderes muligheder og begrænsninger i forhold til at håndtere de ændringer, klimaforandringerne forventes at medføre i vandløbene og på de vandløbsnære arealer subsidiært de udfordringer, de giver for forvaltningen og brugen af vandløbene.

De eksisterende redegørelser om klimaforandringerne og såvel de tidligere som de fremtidige afstrømningsforhold i vandløbene viser, at der allerede er sket betydelige forandringer. De viser også, at landsgennemsnittet for såvel nedbør som afstrømning dækker over store regionale forskelle. Nogle egne har således allerede fået og vil i fremtiden få endnu mere nedbør, men vigtigt er det at være opmærksom på, at der forventes store regionale forskelle mht. den fremtidige nedbør og nedbørsmønsteret.

Diskussionen af, hvordan man i henseende til vandløb skal forholde sig til klimaforandringerne, er endnu kun på det indledende stadium, og redegørelsen giver derfor ikke et dækkende billede af, hvordan og med hvilke virkemidler man i givet fald kan tilpasse vandløbene til de stigende afstrømninger og ikke mindst til de ændrede afstrømningsmønstre.

Kapitel 8 indeholder en kortfattet redegørelse for betydningen af udledning af regnvand fra befæstede arealer til vandløb i forhold til afstrømning og oversvømmelser. Redegørelsen diskuterer på den baggrund den ofte fremførte påstand om, at oversvømmelser af vandløbsnære arealer i mange tilfælde skyldes byernes utilstrækkeligt forsinkede udledning af regnvand.

Det kan ikke afvises, at utilstrækkelig håndtering af regnvand i nogle vandløb giver anledning til oversvømmelser af de ånære arealer og andre uhensigtsmæssigheder, men det er vurderingen, at håndteringen af regnvand fra byer og andre befæstede arealer i dag er genstand for stor bevågenhed og deraf følgende stor indsats og megen nytænkning. Det gælder både i forhold til at få løst eksisterende problemer og i forhold til at imødegå fremtidige problemer som følge af klimaforandringerne.

Kapitel 10 er et efterskrift, der adresserer problemstillingen omkring vandløbenes formruhed og betydningen heraf for vandføringsevnen. Det har ikke inden for rammerne af denne faglige udredning været muligt at komme så langt som ønsket med udredningen om dette emne, og det har derfor været vigtigt for både arbejdsgruppen og følgegruppen at få tydeliggjort over for især myndighederne og interessenterne, at der her er et emne, som bør underkastes en grundig undersøgelse med sigte på at få afklaret formruhedens indflydelse på vandføringsevnen og på, i fald der er tale om en betydende effekt, at få denne gjort operationel i forbindelse med vandspejlsberegninger.

1. INDLEDNING

Der har i de senere år været diskussioner af måden, hvorpå vandløbsmyndighederne foretager kontrol af vandløbenes fysiske tilstand i forhold til de regulativmæssige bestemmelser, herunder måden, hvorpå man måler vandløb op. I 2013 blev der på den baggrund taget initiativ til at udarbejde *"Guidelines til opmåling af vandløb – På vej til en ny standard."*

Der har samtidig været diskussioner af de beregningsmæssige forudsætninger for de vandspejlsberegninger i vandløb, som vandløbsmyndighederne foretager eller lader foretage i forbindelse med både regulativkontrol og specifikke indgreb i vandløbene, eksempelvis ændret vedligeholdelse og restaurering og de hermed forbundne ændringer af profilformen og de hydrauliske egenskaber, heriblandt især Manningtallet.

Diskussionen af de beregningsmæssige forudsætninger drejer sig mestendels om, hvilke tal og værdier, man "fodrer" beregningerne med, og ikke om anvendeligheden af beregningsværktøjerne og Manningformlen.

Orbicon foretager mange vandspejlsberegninger, fortrinsvis for vandløbsmyndighederne, og har derfor en stor interesse i, at der er generel forståelse for og accept af de resultater, som firmaets beregninger og rådgivning leder frem til.

Orbicon har på baggrund af diskussionerne af de beregningsmæssige forudsætninger og rigtigheden af resultaterne søgt og fået bevilliget økonomisk støtte til at udarbejde en teknisk/faglig redegørelse om de beregningsmæssige forudsætninger, der gælder for vandspejlsberegninger i vandløb. Det er Hedeselskabets Medlemsudvalg, der qua medlemmernes særlige interesse i emnet har bevilliget støtten, der er givet med bl.a. følgende begrundelse:

"Brugen af Manningformlen er helt grundlæggende for forståelsen af vandets bevægelse og for vandløbenes fysik, som det præsenteres i vandløbsregulativerne. Det er netop vurderingen af Manningtallet, der ofte skaber debatten mellem interessenterne."

Projektet er gennemført af en arbejdsgruppe bestående af følgende personer:

Klaus Schlünsen, Orbicon
Inger Klint Jensen, Orbicon
Bjarne Moeslund, Orbicon
Henrik Vest Sørensen, Orbicon,

Oplæg til emnevalg er udarbejdet i samarbejde med:

Sten Wegge Laursen, SEGES
Hans Roust Thyssen, SEGES,

som også har bidraget med drøftelse og udvælgelse af de problemstillinger, som skulle være fokuspunkter på det 2. og afsluttende følgegruppemøde.

Arbejdet har været fulgt af en følgegruppe, der foruden Sten Wegge Laursen og Hans Roust Thyssen har haft deltagelse af følgende personer:

Helge Danneskiold-Samsøe, Danske Vandløb
Bjarne Bringedal Svendsen, KTC
Niels Philip Jensen, KL
Peter Hyldegaard, ENVINA
Claus Neergaard, Landøkonomisk Selskab og Østlige Øers Landboforeninger
Torben Larsen, Aalborg Universitet
Jesper Nybo Andersen, Orbicon A/S
Vibeke Højen, Hedeselskabet

Repræsentanter fra forskningsmiljøet på Aarhus Universitet og Københavns Universitet var inviteret med i følgegruppen, men takkede nej af ressourcemæssige årsager. Bæredygtigt Landbrug var også inviteret med i følgegruppen, men ønskede ikke at deltage med henvisning til projektet indhold og formål.

Følgegruppen har drøftet og kommenteret rapportens indhold, og det er i rapporten med særlig skrift anført, hvor følgegruppen i det fremtidige arbejde med udredning af de beregningsmæssige forudsætninger for vandspejlsberegninger ønsker, at der bliver sat fokus på særligt vigtige problemstillinger, som det ikke har været muligt at færdigbearbejde i regi af dette projekt.

Den faglige redegørelse er således blevet til under aktiv medvirken af følgegruppens medlemmer.

2. REDEGØRELSENS EMNEVALG

Redegørelsens emnevalg blev drøftet på det første møde i følgegruppen og resulterede i beslutning om at behandle følgende emner i redegørelsen:

1. Manningformlen og Manningtallet

Manningformlen som grundlag for vandspejlsberegninger.

Hvor og i hvilke situationer er det relevant og/eller nødvendigt at kende Manningtallet? Redegørelse om Manningtallets årstidsvariation og år-til-år-variation, herunder beskrivelse af sandsynligheder og varigheder indenfor Manningtallets variationsspektrum. Betydning af Manningtallets størrelse ved forskellige bundhældninger, vandløbsstørrelser og vandføringer. Beskrivelse af Manningtallets forskellige formkomponenter og disses størrelse, formafhængighed og indflydelse på vandløbenes vandføringsevne.

2. Teoretisk skikkelse

Beskrivelse af regulativprincippet "teoretisk skikkelse" og hvordan det anvendes i praksis.

Er der faktiske og/eller forståelsesmæssige problemer, og i givet fald hvilke og hvor store?

Redegørelse om Manningtal i geometrisk profil vs. i "naturligt profil".

Begrundelsen for at fokusere på dette emne er en formodning fra landbrugets side om, at overgangen fra skikkelsesregulativer til teoretisk skikkelsesregulativer i forlængelse af vedtagelsen af den nugældende vandløbslov fra 1982 har betydet en forringelse af den regulativbestemte vandføringsevne. Eller sagt på en anden måde, så sættes der spørgsmålstegn ved, om det er fagligt velbegrundet at antage, at vandløb med fysisk og formmæssig variation har samme strømningsmodstand som vandløb med ensartet geometriske profil, og dermed om forudsætningen for at benytte ét Manningtal i kontrolberegningerne af vandføringsevnen i teoretisk skikkelsesregulativer holder.

3. Virkemidler i vandløb og fremtidig/ændret vedligeholdelse

Redegørelse for vandstandsmæssige konsekvenser af benyttelsen af virkemiddelkatalogets virkemidler (udlægning af sten og grus, hævning af vandløbsbunden, plantering af træer mv.).

Vandstandsmæssige konsekvenser af grødeskæring under iagttagelse af Manningtallets tidslige variation. Beskrivelse af sandsynligheder/hyppigheder for afvigelser fra midttilstanden.

Redegørelse for betydningen af bundvegetationens, kantvegetationens og brinkvegetationens indflydelse på Manningtallet.

4. Klimaforandringer

Redegørelse på overordnet plan om klimaforandringernes forventede betydning for de beregningsmæssige forudsætninger. Analyse af eksisterende (historiske) data for nedbør og vandføring/afstrømning.

5. Regnvand fra befæstede arealer

Redegørelse på overordnet plan for betydningen af udledning af regnvand fra befæstede arealer for vandspejlsberegninger i vandløb.

I tillæg til ovennævnte emner indeholder redegørelsen en præsentation og vurdering af resultaterne af et feltforsøg, der blev gennemført for at beskrive de faktiske vandstandsmæssige effekter af specifikke fysiske forandringer i vandløb, samt for at give mulighed for at sammenligne målte vandstande med beregnede vandstande.

Projektgruppen skylder Køge Kommune og HedeDanmark stor tak for hjælpen med tilrettelæggelsen og den praktiske gennemførelse af feltforsøgene i Kimmerslev Møllebæk. Uden denne hjælp kunne forsøgene ikke have været gennemført.

Det har derudover været muligt at inddrage data fra grødeskæring i et sjællandsk vandløb – Fladmose Å - til belysning af effekten af grødeskæring på vandstanden. *Projektgruppen skylder Slagelse Kommune stor tak for at have ladet grødeskæringen i Fladså gennemføre på en måde, der kunne kaste ekstra lys over effekterne i forhold til indsatsen. Projektgruppen skylder i samme anledning Naturstyrelsen (nu Miljøstyrelsen) tak for at have stillet beregnede vandføringsdata til rådighed uden for de normale terminer.*

3. HYDRAULISKE BEREGNINGFORMLER

Vandspejlsberegninger foregår i dag stort set udelukkende ved benyttelse af Mannings formel, men der findes og benyttes også andre formler.

De formler, der siden begyndelsen af det attende århundrede er blevet benyttet til beregninger af vandstanden i vandløb og kanaler, er alle empiriske, det vil sige at de bygger på erfaringer og forsøg. I det følgende er der givet en kortfattet oversigt over de mest benyttede formler.

Kendskabet til, hvilke formler, der er benyttet gennem tiden, er vigtigt i forhold til vurderingen af det beregningsmæssige grundlag, der er anvendt op gennem tiden. Vigtigheden skyldes, at man ved sammenligning af nutidige tilstande med de tilstande, der blev beskrevet og dimensioneret tidligere, foretager sammenligning af tilstande, der ikke er baseret på de samme beregningsmæssige forudsætninger. Det er et vigtigt faktum i almindelighed, men i særdeleshed når det gælder de beregningsmæssige forudsætninger i regulativtypen "teoretisk skikkelse".

Det er valgt at gengive og beskrive formlerne i fagsprog, vel vidende at de fleste læsere ikke har de faglige forudsætninger for at forholde sig til detaljerne og forskellene. Formålet med at gengive formlerne er i denne sammenhæng derfor alene at beskrive historikken og derigennem tydeliggøre de forskelle, som brugen af de forskellige formler giver anledning til.

3.1. Chézy's formel

I 1776 skrev Antoine Chézy en artikel med titlen: *"Formel til at finde den ensartede hastighed, vandet vil have i en grøft eller en kanal, hvor hældningen er kendt."*

I denne artikel blev Chézy's formel præsenteret.

$$v = C\sqrt{RI}, \text{ hvor}$$

v = middelvandhastigheden (m/s)

C = Chézy's tal ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)

R = hydraulisk radius (m)

I = hældning (dimensionsløs)

Formlen bygger på den teoretiske energi-ligning (også kaldet Bernoulli-ligningen).

Hydraulisk radius er defineret som A/P , hvor A er gennemstrømningsarealet (m^2) og P er den befugtede perimeter¹ (m).

¹Den befugtede perimeter er den samlede længde, man skal tilbagelægge, når man langs sider og bund bevæger sig fra vandkanten i den ene side af vandløbet til vandkanten i den anden side.

Ved hældningen (I) menes hældningen på energilinjen. Denne linje får man ved at beregne vandets samlede energi (beliggenhedsenergi og bevægelsesenergi)² ned gennem vandløbet. Har et vandløb samme form og fald på en strækning, og vandet dermed samme hastighed, vil bunden, vandspejlet og energilinjen være parallelle, og man kan derfor benytte bundhældningen eller vandspejlshældningen i stedet for energilinjens hældning.

I beregningsprogrammer beregnes altid energilinjehældningen.

3.2. Coldings formel

Ludvig August Colding (1815 - 1888) var en dansk ingeniør og fysiker, der parallelt med James Prescott Joule og Julius Robert von Mayer formulerede termodynamikkens første lov og fik international berømmelse. Samtidig udøvede han en omfattende ingeniørvirksomhed i København.

I P. Feilberg: "Om strømforhold" (Søborg 1891-94) står der: "Her i Danmark benyttes, i alt fald ved Undervisning sædvanligvis Coldings Formel".

$$v = \sqrt{\frac{h R}{K \left(1 + \frac{1}{v}\right)}}$$

hvor

$$K = 2$$

v = middelvandhastigheden (Fod/s)

R = hydraulisk radius (Fod)

h = fald i Fod over 10000 Fod

3.3. Ganguillet og Kutter

De tyske ingeniører Emile Ganguillet og Wilhelm Rudolf Kutter præsenterede i 1869 en ny hydraulisk formel.

Formlen tager udgangspunkt i Chézy's formel: $v = C\sqrt{RI}$

C beregnes:

$$C = \frac{\left(a + \frac{l}{n} + \frac{m}{I}\right)}{1 + \left(a + \frac{m}{I}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

hvor

$$a = 23$$

$$l = 1,00$$

$$m = 0,0155$$

² Se kapitel 4.

Størrelsen af koefficienten n er afhængig af, hvor ru den befugtede perimeter er. n er altså en ruhedsparameter i lighed med Chézy's C og Mannings M (Manningtallet).

$$v = \frac{\left(23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{I}\right)}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{I}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \sqrt{R I}$$

hvor

v = middelvandhastigheden (m/s)

n = ruhedsparameter

R = hydraulisk radius (m)

I = hældningen (dimensionsløs)³

I Aa. Feilberg og C.L. Feilberg, *Kulturteknisk vandbygning* (1921) står der, "at man passende kan bruge Ganguillet og Kutters nyere Forslag for Kanaler og Vandløb, i hvilket Tilfælde man paa Grund af Formlens Omstændighed nødes til at betjene sig af Tavler og Tabeller".

Men hensyn til „Tavler og Tabeller“ henvises der til G. Schewior: *Hilfstafeln zur Bearbeitung von Meliorationsentwürfen*. Det er sandsynligvis disse tavler, der fra 1920'erne og i en årrække fremefter blev anvendt i forbindelse med projektering og dimensionering af reguleringer af danske vandløb.

3.4. Mannings formel

Robert Manning (1816–1897) sammenlignede og vurderede de på den tid syv mest kendte formler, her i blandt Ganguillet's og Kutter's formel.

Han beregnede hastigheden med hver formel for en given hældning og hydraulisk radius i intervallet fra 0,25 m til 30 m. Han beregnede derefter middelværdien af de syv hastigheder og udviklede på den baggrund en formel, der passede med de beregnede middelværdier:

$$v = M \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}, \text{ hvor}$$

v = middelvandhastigheden (m/s)

M = Manningtallet ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)

R = hydraulisk radius (m)

I = hældningen (dimensionsløs)⁴

Manning fandt ved sine beregninger, at M svarede nøje til Ganguillet's og Kutter's ruhedsparameter n .

Det bemærkes, at mens man i Danmark anvender Manningtallet M , så benytter man eksempelvis i USA ruhedsparameteren $n = 1/M$, se boksen:

³ I nogle sammenhænge anvendes bundhældningen i stedet for vandspejlshældningen.

⁴ I nogle sammenhænge anvendes bundhældningen i stedet for vandspejlshældningen.

Ruhedsparameteren n ($= 1/M$) er ifølge US Geological Survey sammensat af en række forskellige komponenter:

$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m$, hvor

n_b = basisværdi for retlinet, glat og ensformig kanal i naturlig jord ($n_b = 0,012-0,026$)

n_1 = korrektion for uregelmæssigheder på bunden ($n_1 = 0-0,020$)

n_2 = korrektion for tværsnitsvariationer ($n_2 = 0-0,015$)

n_3 = korrektion for forhindringer (obstruktioner) ($n_3 = 0-0,05$)

n_4 = korrektion for vegetation (grøde) ($n_4 = 0-0,1$)

m = korrektionsfaktor for mæandring ($m = 1,0-1,3$)

Kilde: Torben Larsen 2017. Manningtallet for vandløb – en udtømmelig kilde til diskussion. Vand og Jord nr. 2, maj 2017, side 70-73.

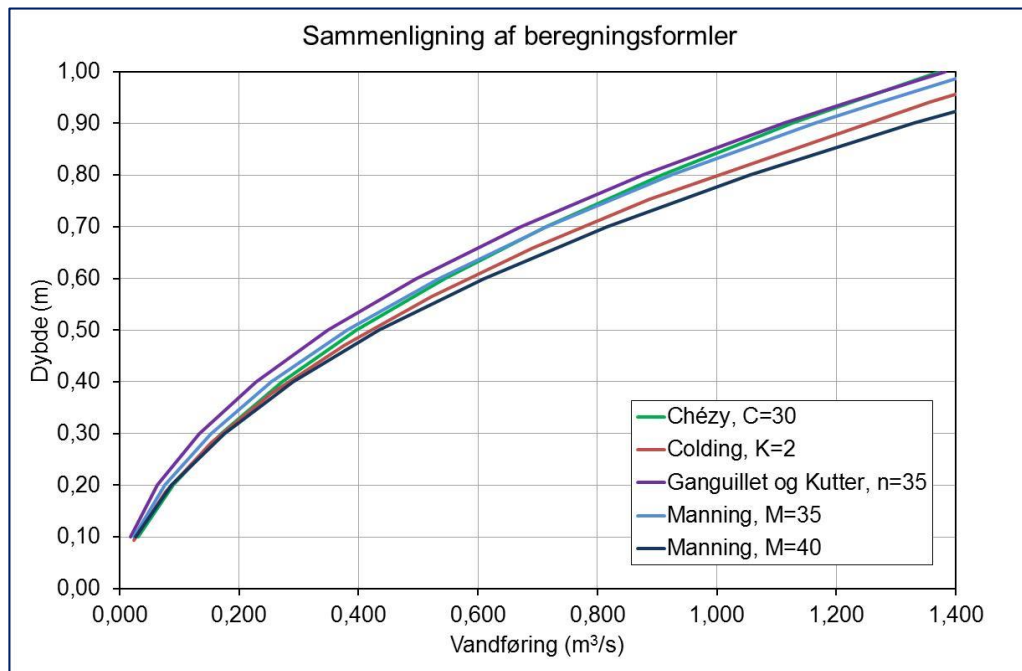
Det er effekten af disse formkomponenter på den samlede ruhedsparameter n , og dermed på Manningtallet, der ligger til grund for diskussionen af, hvilken betydning fysisk og formmæssig variation i vandløb har for vandføringsevnen og beregninger af denne, set i relation til retlinede, glatte og ensformige kanaler. Denne diskussion drejer sig både om kontrolberegninger i vandløb, der administreres efter regulativtypen teoretisk skikkelse, og om beregninger af fremtidige vandspejl som følge af indsatser (benyttelse af virkemidler) til forbedring af den fysiske vandløbskvalitet.

3.5. Brugen af formlerne

En granskning af litteraturen viser, der ved beregning af vandstanden i danske vandløb er benyttet følgende formler op gennem tiden:

Periode	Formel
1860 – 1920	Colding
1920 – 1980	Ganguillet og Kutter
1980 –	Manning

De beskrevne formler er i det følgende benyttet til beregning af sammenhængen mellem vandføring og vandstand i et vandløb med bundbredde på 1 meter og en hældning på 1‰.



Figur 3.1. Sammenligning af relationen mellem vandføring (Q) og vandstand (dybde = H) ved brug af de fire formler, eksemplificeret ved et vandløb med en bundbredde på 1 meter, anlæg 1 og en bundhældning på 1‰.

Det fremgår af figur 3.1, at den største beregnede vandføringsevne fås ved beregning med Mannings formel (M=40). Den mindste vandføringsevne fås med Ganguillet og Kutters formel (n=35).

Chézy-formlens dybdeafhængighed ses også på figuren. Formlen giver, sammenlignet med de øvrige formler, større beregnet vandføringsevne ved små dybder og mindre vandføringsevne ved stor dybde. Det kommer til udtryk ved at Chézy-kurven krydser de øvrige kurver i figur 3.1, hvilket betyder, at store vandføringer med Chézy-formlen afledes ved højere vandstande end beregninger med de øvrige formler, og omvendt ved små vandføringer.

H.C. Aslyng (1915-2010) er en af de danske forskere, der gennem et mangeårigt virke på Den Kongelige Veterinær- og Landbohøjskole beskæftigede sig mest med de kulturtekniske forhold i landbruget, herunder ikke mindst afvandingsforholdene. I *"Forelæsninger om afvanding i jordbruget"* benyttede han Chézy's formel til vandspejlsberegninger i vandløb, men da C (Chézy's tal) er dybde-/bredde-afhængigt, benyttede han Mannings formel til beregning af C ($C = M \cdot R^{1/6}$).

Grunden til at Aslyng er særlig interessant i relation til vandspejlsberegninger er, at der i diskussionerne af de beregningsmæssige forudsætninger ofte henvises til Aslyngs lærebøger og beregningsprincipper. Det gælder i særlig grad i diskussionerne af de beregningsmæssige forudsætninger i regulativtypen "teoretisk skikkelse", se kapitel 4, hydraulisk radius vs. modstandsradius.

Det er disse diskussioner og behovet for en afklaring af de beregningsmæssige forudsætninger, der er begrundelsen for i det følgende at "dykke" forholdsvis langt ned i en række fagligt vanskeligt tilgængelige emner og spørgsmål.

4. PARAMETRENE I VANDSPEJLSBEREGNINGER

Grundlaget for vandspejlsberegninger i vandløb er betragtninger af energi og energiomsætning i det strømmende vand.

I strømmende vand findes energi i to former: beliggenhedsenergi (potentielt energi) og bevægelsesenergi (kinetisk energi). Hvis der ikke var nogen modstand mod vandets bevægelse, ville vandet bevæge sig hurtigere og hurtigere ned i gennem vandløbet (den potentielle energi bliver omsat til kinetisk energi). Det sker ikke i virkelighedens vandløb, hvilket skyldes, at der sker et tab af energi, fordi det strømmende vand i vandløb "oplever" modstand fra gnidningen mod bunden og fysiske elementer (grøde og sten mv.).

Man regner med to former for energitab: enkelttab og friktionstab.

Enkelttab

Hvis en tværsnitsændring ikke sker jævnt og gradvis, som det f.eks. er tilfældet ved broindløb og -udløb, vil der dannes hvirvler i vandløbet. Denne hvirveldannelse (turbulens) koster energi, og dette energitab, der kaldes enkelttab, kan beregnes med Carnot's formel. Den lyder:

$$\Delta h = \epsilon \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

Δh = Enkelttab (m)

v_1 = Hastighed i de mindste tværsnit (m^2/s)

v_2 = Hastighed i det største tværsnit (m^2/s)

g = Tyngdeacceleration = $9,81 \text{ m/s}^2$

ϵ = Enkelttabskoefficient, ca. 1 for brat udvidelse og ca. 0,5 for brat indsnævring⁵.

Det ses, at enkelttabet er stort, hvis forskellen mellem hastighederne i profilerne lige opstrøms og nedstrøms indsnævringen er stor.

Hvis man beregner enkelttabet i et broudløb, hvor vandløbstværsnittet nedstrøms broen er dobbelt så stort som broudløbet, og man sætter hastigheden i broudløbet til 1 m/s , så vil man med Carnot's formel få beregnet et enkelttab på:

$$\Delta h = 1 \frac{(1 - 0,50)^2}{2 * 9,81}$$

Altså $1,3 \text{ cm}$.

Foretages en lignende beregning i et vandløb, hvor f.eks. en indsnævring bevirker, at hastigheden øges fra $0,40 \text{ m/s}$ til $0,50 \text{ m/s}$, fås et samlet enkelttab (indløbstab og udløbstab) på under 1 millimeter .

Det er indlysende at man kan se bort fra enkelttab i sådanne tilfælde.

⁵ 0,5 og 1 er at betragte som maksimumsværdier for enkelttab. Værdierne er valgt for ikke at underestimere betydningen af enkelttab.

Hvorvidt et enkelttab er af betydning, afhænger i øvrigt af den konkrete situation.

Friktionstab

Den anden form for energitab, friktionstabet, beregnes i danske vandløb, uanset hvilket beregningsværktøj, der benyttes, fortrinsvis ved brug af Manningformlen. Friktionstabet kommer dermed til udtryk gennem Manningtallet, der relaterer sig til den ruhed, det strømmende vand "oplever" ved passagen over faste flader.

Idet $Q = v \cdot A$ [vandføringen (m^3/s) er lig med den gennemsnitlige vandhastighed (m/s) gange gennemstrømningsarealet (m^2)] kan formelen (kapitel 3.4) omskrives til:

$$Q = A \cdot M \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}, \text{ hvor}$$

Q = vandføringen (m^3/s)

A = tværsnitsarealet (m^2)

M = Manningtallet ($m^{1/3}/s$)

R = hydraulisk radius (m) eller modstandsradius (m)

I = hældningen⁶ (dimensionsløs)

Det gælder således, at for konstant vandføring indebærer en nedsættelse af vandets hastighed en øgning af tværsnitsarealet, hvilket for et givet vandløbstværsnit betyder en øgning af vandstanden. Det hænger sammen med, vandløbenes faste sider og bund kun tillader tværsnitsarealet at udvide sig opadtil.

Manningformlen giver imidlertid ikke et udtryk for vandstanden H (m), hvorfor denne vigtige parameter må beregnes indirekte.

Beregningsværktøjer som VASP og MIKE gør det både muligt og nemt at foretage beregningerne af vandstanden (eller vandspejlskoten) for lange vandløbstrækninger af gangen, forudsat at beregningerne kan "fodres" med de nødvendige data.

Et meget væsentligt punkt i den forbindelse er, om der benyttes hydraulisk radius eller modstandsradius.

4.1. Hydraulisk radius vs. modstandsradius

Sten og grøde på vandløbs bund har større indflydelse på vandhastigheden ved lille vanddybde end ved stor vanddybde. Det betyder, at man ved benyttelse af hydraulisk radius benytter en inputparameter, der ikke har samme gyldighed/betydning ved lave som ved høje vandstande.

Denne dybdeafhængighed bliver ikke taget i regning, hvis man i Mannings formel benytter hydraulisk radius. Det betyder, at hvis man beregner Manningtal ved benyttelse af hydraulisk radius, så bliver værdierne ikke de samme ved lav vanddybde som ved stor vanddybde.

⁶ Rettelig hældningen af energilinjen

F. A. Engelund udviklede derfor i midten af 1960'erne en ny type radius: modstandsradius⁷:

$$\sqrt{R_*} = \frac{1}{A} \int_0^B y^{\frac{3}{2}} dx$$

hvor

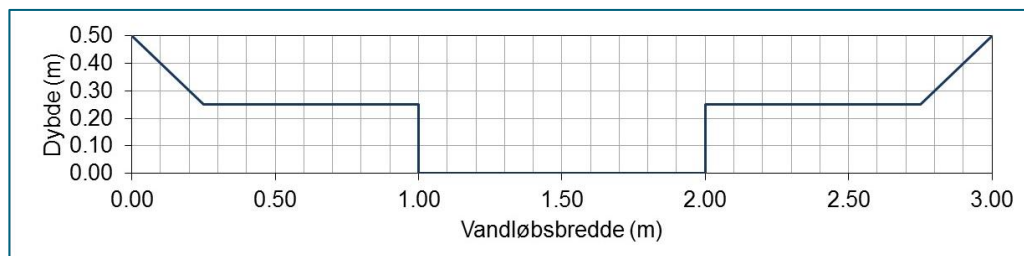
R_* = Modstandsradius

A = Tværsnitsarealet (m^2)

B = Vandløbsbredden (m) ved vandspejlshøjden

y = Vandløbsdybden (m)

Forskellen mellem de 2 radiustyper kan illustreres ved at betragte de hastigheder, der kan beregnes i et vandløb med en hældning på 1 ‰, et Manningtal på 20 og et tværprofil som vist på figur 4.1.



Figur 4.1. Dobbeltprofil til illustration af forskellen mellem hydraulisk radius og modstandsradius.

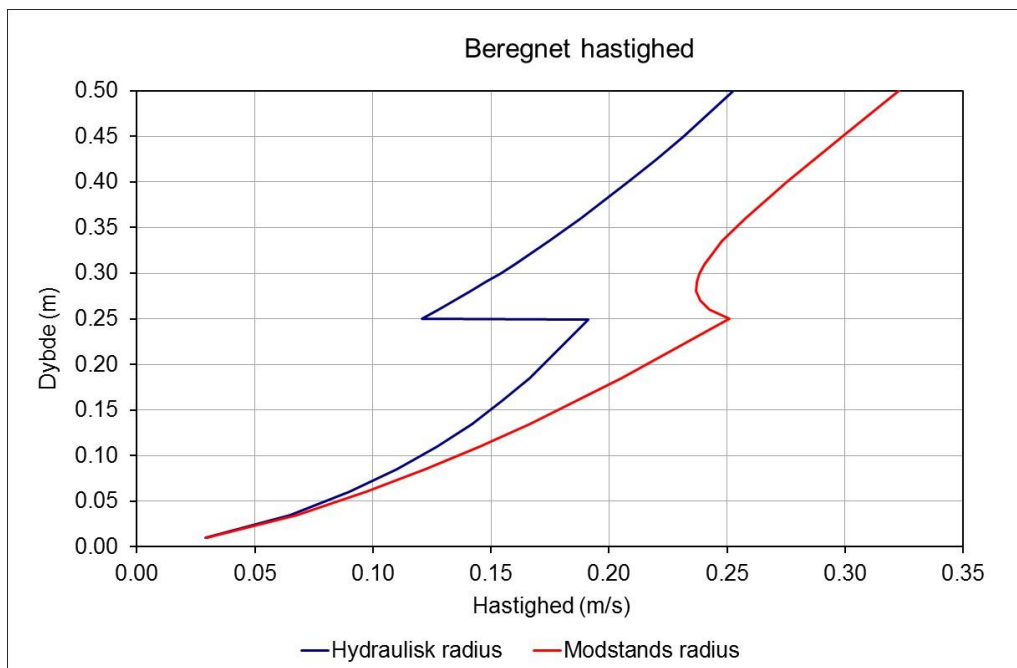
Beregnes hydraulisk radius (R) i eksemplet i figur 4.1 for en vandstand lige under henholdsvis lige over banketten⁸ fås, idet $R=A/P$, at $R = (0,25 \cdot 1/1,50) = 0,167$ ved en vandstand lige under banketten henholdsvis $R=(0,25 \cdot 1/3,00) = 0,083$ ved en vandstand lige over banketten. Der sker altså i dette eksempel en brat ændring af den hydrauliske radius ved en ubetydelig øgning af vandstanden, og det vel at mærke en øgning af vandstanden, der ikke resulterer i nogen betydende øgning af gennemstrømningsarealet.

Ved en tilsvarende beregning af modstandsradius finder man, at arealerne ved en vandstand lige over og lige under banketten er ens. Vanddybden på banketterne er 0, og bidrager derfor ikke til R_* . Modstandsradius ($R_* = 0,250$) er derfor ens lige over og lige under banketten.

Den beregnede middelhastighed i vandløbet vil i dette eksempel falde markant ved en vandstandsstigning på i størrelsesordenen <1 cm, se figur 4.2. Det er indlysende, at dette ikke er korrekt, idet den lille vandstandsstigning ikke vil påvirke hastigheden i den del af profilet, der ligger under banketkanten. Problemet skyldes, at der benyttes en parameter, der ikke afspejler de faktiske forhold korrekt.

⁷ Det bemærkes, at modstandsradius er en dansk "opfindelse", som stort set kun benyttes i Danmark.

⁸ Banketten er den vandrette del af brinken i dobbeltprofilet.

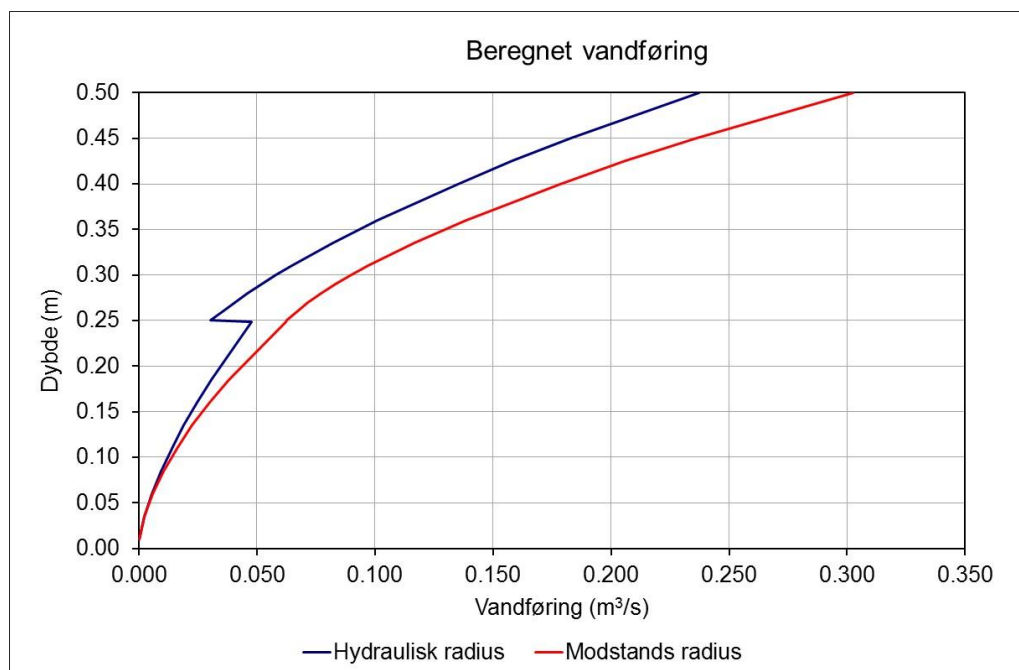


Figur 4.2. Beregnede vandhastigheder i profilet i figur 4.1 ved brug af hydraulisk radius henholdsvis modstandsradius. Bemærk at springene sker ved vandstand 0,25, svarende til den vandrette banket i figur 4.1.

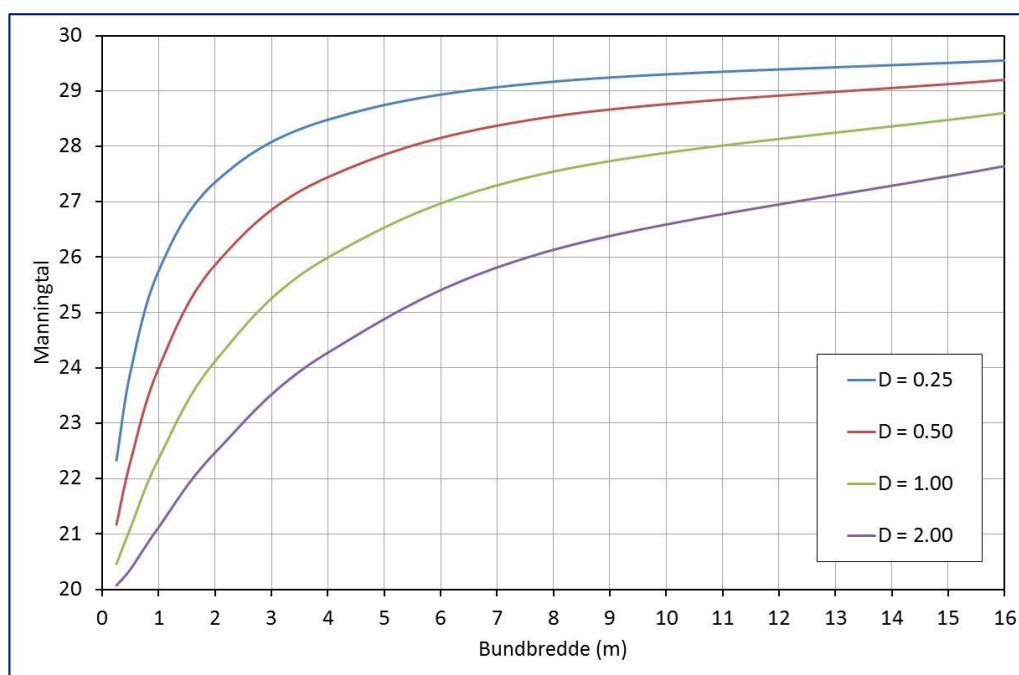
Forskellene mellem de beregnede hastigheder har indflydelse på størrelsen af de beregnede vandføringer, se figur 4.3, idet vandføringen beregnes som hastighed gange tværsnitsareal: $Q = v \cdot A$.

Da modstandsradius i modsætning til hydraulisk radius tager højde for dybden, er der ikke én-til-én-sammenhæng mellem de Manningtal, der skal benyttes.

I figur 4.4 er vist, hvilke Manningtal man skal anvende ved vandspejlsberegninger med modstandsradius, hvis man skal opnå samme resultat som ved beregning med hydraulisk radius og Manningtal 30.



Figur 4.3. Beregnet vandføring i profilet i figur 4.1 ved benyttelse af hydraulisk radius henholdsvis modstandsradius.



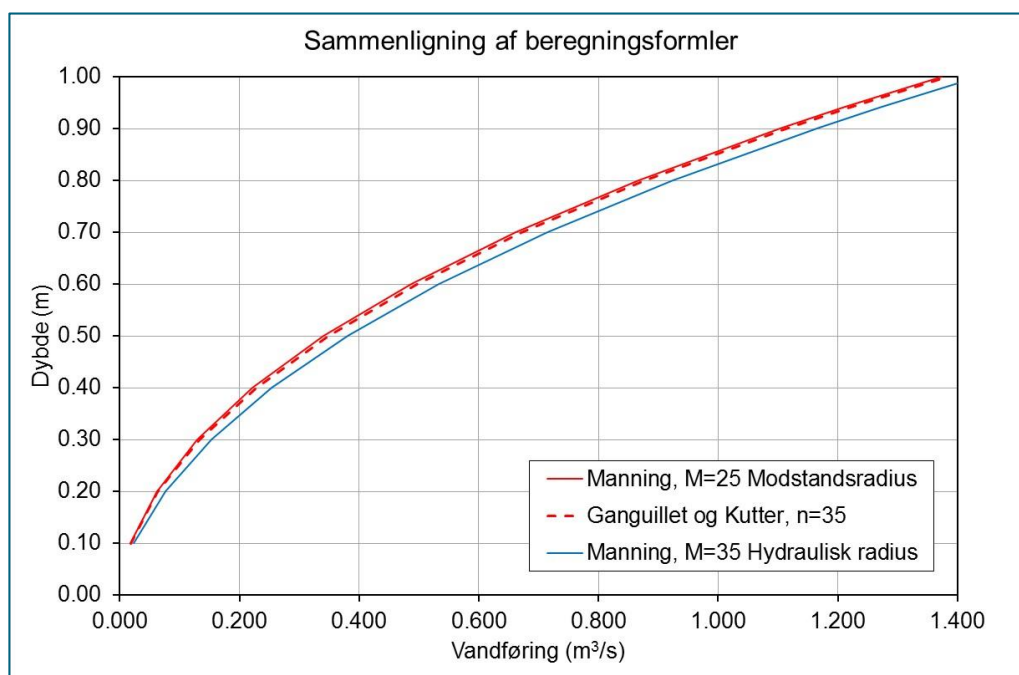
Figur 4.4. $M_{\text{modstandsradius}}$ beregnet for $M_{\text{hydraulisk radius}} = 30$ i et trapezformet profil med anlæg 1. Vandløbshældning = 1 ‰. D er vanddybden i meter.

Det ses af figur 4.4, at hvis forholdet mellem vandløbets dybde og bredde er lille (stor bredde i forhold til dybden), skal man anvende et Manningtal op mod 30. Er forholdet derimod stort (lille bredde i forhold til dybden) skal man bruge et Manningtal der er meget mindre end 30.

4.1.1 Konklusion

Analyserne af betydningen af at benytte hydraulisk radius henholdsvis modstandsradius viser, at benyttelse af hydraulisk radius kræver brug af et større Manningtal end benyttelsen af modstandsradius gør for at beskrive (beregne) en given situation. Og da der kan argumenteres for, at modstandsradius, i mange tilfælde, er den mest retvisende parameter at benytte, vil resultater ved benyttelse af hydraulisk radius kunne ses som en afvigelse fra "de korrekte" resultater.

Det er en meget vigtig konstatering i relation til valg af Manningtal i regulativtypen "teoretisk skikkelse", hvor kontrolberegningerne i dag foregår ved benyttelse af modstandsradius, med reference til en tilstand, der i sin tid blev beskrevet/beregnet ved benyttelse af hydraulisk radius, se kapitel 5.



Figur 4.5. Grafer, der viser forholdet mellem vandføring og vandstand, beregnet med 3 forskellige formler.

Den sammenhæng mellem vandføring og vandstand, der er vist på figur 4.5, er beregnet med samme forudsætninger som figuren i afsnit 3.5.

Det ses af figuren, at der kun er en lille forskel på de beregnede sammenhænge, beregnet med Manningformlen og $M=35$ og hydraulisk radius (blå linje) henholdsvis Ganguillet og Kutter's formel, $n=35$. (rød stiplede linje).

Hvis man vil opnå samme resultat ved anvendelse af Mannings formel og modstandsradius som med Ganguillet og Kutter's formel, skal man benytte et Manningtal på 25 (rød linje)

Som nævnt i afsnit 3.5 er det sandsynligvis Ganguillet og Kutter's formel ($n=35$), der er benyttet ved regulering af danske vandløb. Hvis man vil sammenligne vandføringsevnen i reguleringsprojektet og den eksisterende vandføringsevne (beregnet på opmålingsdata) må man altså benytte et Manningtal på 25, hvis man i beregningerne benytter modstandsradius (se afsnit 5.2 om teoretisk skikkelse).

Det skal nævnes, at der i flg. Torben Larsen (2017) kan argumenteres for, at *"Modstandsradius bør bruges ved meget brede floder og vandløb, og hydraulisk radius skal bruges ved rør, kanaler og vandløb, hvor bredden ikke er meget større end vanddybden. Begge begreber er praktiske tillem্পninger til et kompliceret 3-dimensionalt strømningsproblem, hvor også de langsgående retnings- og tværsnitsvariationer (mæandring) spiller ind. Derfor kan der ikke gives præcise retningslinjer for, hvornår det ene eller det andet er det mest rigtige (dvs. giver den mindste fejl i forhold til virkeligheden)."*

Set i forhold til danske forhold, hvor bredden i de fleste vandløb er markant større end vanddybden, giver ovenstående argumentation ikke en klar indikation af, hvilken af de to parametre, der giver de mest retvisende resultater. Det er på den baggrund og under alle omstændigheder vigtigt, at man ved benyttelse af modstandsradius og hydraulisk radius benytter de Manningtal, der korresponderer med de to radier, det vil sige at man ikke benytter Manningtal, der er beregnet ved brug af hydraulisk radius til vandspejlsberegninger ved brug af modstandsradius, og vise versa.

4.2. Manningformlens parametre

De fleste af Manningformlens parametre

$$Q = A \cdot M \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

kan beskrives/kvantificeres på grundlag af målinger, det vil sige målinger af vandføringen og opmålinger af vandløbenes fysiske tilstand (tværsnitsprofiler og længdeprofiler, ud fra hvilke den hydrauliske radius eller modstandsradius og bundhældningen kan beregnes).

4.2.1 Opmålingsdata

Har man en retvisende opmåling af det vandløb, man skal foretage beregninger på, er det forholdsvis enkelt at beregne sammenhængen mellem vandspejlshøjden (h) og tværsnitsarealet (A), modstandsradius eller hydraulisk radius (R) og vandløbets hældning (I)

Jo mere nøjagtige opmålingsdata man kan "fodre" beregningerne med, desto mere retvisende resultater får man for så vidt angår disse parametre. Det betyder, at nøjagtigheden af vandspejlsberegningerne både teoretisk set og i praksis kan forbedres ved at øge detaljeringsgraden af opmålingsdata⁹.

4.2.2 Vandføring

Vandføringen er i de fleste vandløb en parameter, der udviser stor tidslig variation som følge af variationer af nedbøren og grundvandstilstrømningen samt tilledningen af vand fra eksempelvis renseanlæg. Det kræver derfor intensive målinger at tilvejebringe retvisende billeder med stor tidslig opløsning af vandføringens størrelse og variation.

Der findes flere måder at tilvejebringe vandføringsdata.

Den mest omfattende metode er at opsætte en hydrometrisk station, hvor man foretager hyppige registreringer af vandstanden, og ud fra denne og kendskab til sammenhængen mellem vandføringens størrelse og vandstanden på stationen foretager beregninger af vandføringen. Denne metode kan tilvejebringe vandføringsdata med stor tidslig opløsning, eks. minutværdier.

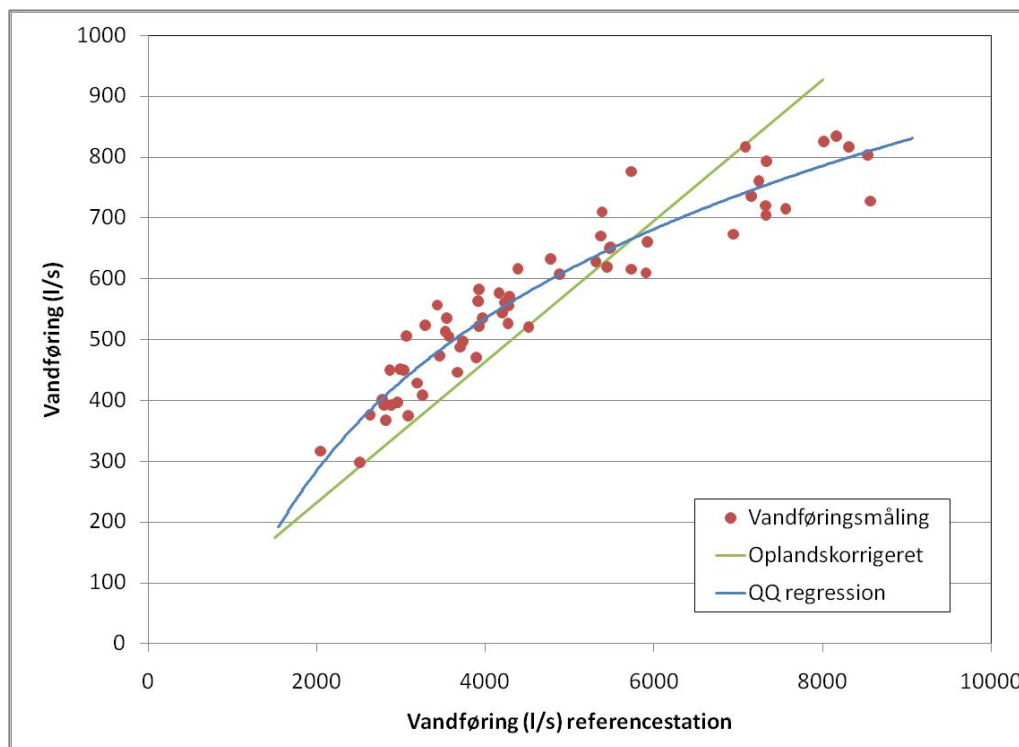
Hydrometriske stationer er i kraft af deres krav til instrumentering, tilsyn, kalibrering og beregninger undtagelsen mere end reglen i de danske vandløb, hvorfor man i langt de fleste vandløb og på de fleste strækninger er henvist til at skaffe vandføringsdata på anden vis.

En af måderne er at antage, at afstrømningen fra oplandet (topografisk) til et vandløb med umålt vandføring ligner afstrømningen fra oplandet (topografisk) til et vandløb med en hydrometrisk station. Det giver mulighed for, ud fra kendskab til oplandets størrelse, at konstruere en tidsserie med vandføringsdata for vandløbet uden målinger med den metode, der benævnes "oplandskorrektion" ud fra topografiske oplande.

Metodens nøjagtighed kan øges ved at foretage nogle få årlige bestemmelser af vandføringen i vandløbet uden målestation og med disse data kalibrere de data, der er konstrueret ved oplandskorrektion. Denne metode benævnes "QQ-regression".

Spørgsmålet er imidlertid, hvor godt konstruerede vandføringsdata beskriver vandføringens faktiske størrelse og variation. Figur 4.6 og 4.7 illustrerer, hvorledes valget af metode til vandføringsbestemmelse i et umålt vandløb påvirker den resulterende tidsserie for vandføringsdata.

⁹ Det er i praksis ikke muligt at foretage meget detaljerede opmålinger, idet sådanne er meget ressourcekrævende. Det samme gælder vandføringen, idet dette problem dog i vandløb med hydrometriske stationer er løst gennem kontinuerlige målinger af vandstanden og beregning af vandføringen på grundlag heraf med kalibrering ud fra nogle få årlige vandføringsbestemmelser med vingemåler.

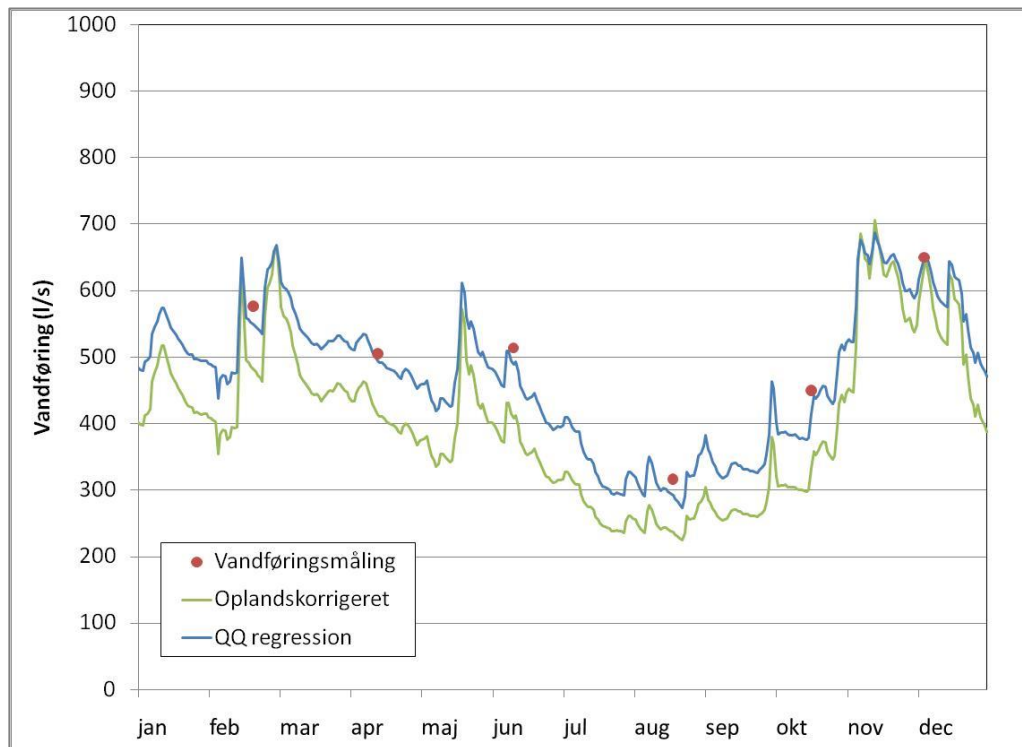


Figur 4.6. Eksempel på forskellen i beregningsgrundlaget ved brug af oplandsarealet (oplandskorrektion) henholdsvis QQ-princippet. Figuren viser, at der kan være betydende forskelle ved både små og store vandføringer.

Afvigelsen mellem de to vandføringsberegninger kan eksempelvis skyldes, at vandløbet uden målinger har et større hydrologisk opland end det topografiske opland, hvorfor oplandskorrektionen underestimerer vandføringen.

Den ofte nødtvungne brug af konstruerede vandføringsdata betyder, at beregningsgrundlaget for vandspejlsberegninger af den grund vil være behæftet med en vis usikkerhed – en usikkerhed, hvis størrelse man almindeligvis ikke kender. Og da man intuitivt ved, at vandføringens størrelse alt andet lige er en parameter, der påvirker vandstanden, ligger der i denne del af datagrundlaget en kilde til usikkerhed på vandspejlsberegningerne.

Det skal for fuldstændighedens skyld nævnes, at selv ikke de mest omhyggelige og detaljerede målinger kan eliminere usikkerheden på vandføringsdata, men ved at foretage vandføringsbestemmelserne efter de forskrifter, der erfaringsmæssigt giver de mest nøjagtige og retvisende data, vil vandføringsdata være at betragte som BAT (Best Available Technology).



Figur 4.7. Eksempel på en konstrueret tidsserie ved hjælp af oplandskorrektion henholdsvis QQ-regression. De røde markeringer angiver målte vandføringer (vingemålinger) i forhold til de beregnede vandføringer.

4.2.3 Manningtallet

Den sidste parameter i Manningformlen - Manningtallet - er udtryk for ruheden, det vil sige at det er et udtryk for den modstand fra vandløbets sider og bund, som det strømmende vand "oplever". Manningtallet er stort, når modstanden er lille, mens Manningtallet er lille, hvor f.eks. store sten eller grøde giver modstand mod strømmingen. En modstand der bl.a. giver anledning til hvirveldannelse. Også vandløbets form og fysiske variation har i følge udenlandsk litteratur betydning for modstanden mod vandets frie løb, men størrelsen af denne modstand og dermed betydningen af denne "formruhed" har ikke kunne afklares i regi af denne faglige udredning.

Manningtallet kan ikke måles med noget instrument, men kan beregnes ud fra målte vandstande, hvis man har retvisende vandførings- og opmålingsdata.

Det lyder umiddelbart som en nem måde at bestemme Manningtal på, men virkeligheden er af forskellige årsager desværre en helt anden:

- Vandføringsdata foreligger ikke eller er behæftet med stor usikkerhed
- Aktuelle opmålingsdata foreligger ikke eller detaljeringsgraden er for ringe

Begge disse årsager betyder, at Manningtalsbestemmelsen meget ofte er behæftet med stor usikkerhed.

Usikkerheden på Manningtalsbestemmelsen er imidlertid ikke alene bestemt af usikkerheden på vandførings- og opmålingsdata. Mange analyser har vist, at Manningtallet er en parameter, der varierer meget i både tid og rum.

Tidsmæssigt er det velkendt, at Manningtallet på de store linjer udviser en tydelig årstidsvariation primært som følge af grødens opvækst og henfald med de største værdier om vinteren, når grødemængden er mindst, og de laveste værdier i forbindelse med kulminationen af grødens vækst og biomasse.

Manningtallet udviser imidlertid også betydelig variation fra år til år, og denne variation har i en række vandløb vist sig at være så stor, at den i mange tilfælde helt overskygger de Manningtalsændringer, man kan skabe gennem grødeskæring, eller som opstår som følge af umålte profilændringer¹⁰, jf. (Ovesen et al., 2015)

Denne tidslige variation af Manningtallet betyder, at selvom man på en station har data, der muliggør beregninger af eksempelvis daglige Manningtal, så kan man ikke med nøjagtighed forudsige fremtidige Manningtal på denne station.

Den tidslige variation er imidlertid ikke det eneste problem. Det er velkendt, at når man kigger ned ad eller på tværs af et vandløb, vil man ofte kunne se en variation i mængden af grøde og ofte også en variation i grødens sammensætning og struktur. Denne rumlige eller stedlige grødemæssige variation er det synlige tegn på, at Manningtallet varierer både i vandløbenes længderetning og på tværs af vandløbene. Det Manningtal og den Manningtalsvariation, der gælder for én delstrækning eller ét tværsnit gælder derfor ikke nødvendigvis for andre delstrækninger og andre tværsnit.

Derudover gælder det, at Manningtallet også varierer i det lodrette plan inden for vandløbsprofilen. I små vandløb med veludviklet brinkvegetation vil Manningtallet i bunden af profilen ofte være et andet (typisk større) end i den øvre del af profilen, der er bevoxet med høj, stivstænglet vegetation. Denne forskel skyldes, at brinkvegetationen i mange små vandløb begrænser grødeudviklingen på bunden gennem skygning. Og forskellen har den konsekvens, at små vandføringer "oplever" en mindre ruhed (højere Manningtal), mens store vandføringer "oplever" en større ruhed (lavere Manningtal). På tilsvarende vis kan små vandføringer "opleve" større ruhed ved veludviklet grøde på bunden. Det faktum betyder, at man ikke altid kan benytte beregnede Manningtal ved små vandføringer til vandspejlsberegninger ved store vandføringer, og vise versa. Det bemærkes, at betragtningerne omkring modstandsradius alene vedrører det fysiske profil, og at grødens ruhed ikke indgår.

Endelig er det, fortrinsvis i små vandløb, et problem i relation til Manningtalsbestemmelsen, at formen af det fysiske profil slår igennem på de beregnede Manningtal. Dette problem kommer ofte til udtryk derved, at alle fysiske variationer i det vandførende profil skal opmåles. Hvis der ikke er opmålt tilstrækkeligt detaljeret, vil den mangelfulde fysiske beskrivelse af vandløbsprofilen betyde, at man, for at få beregnede vandstande til

¹⁰ Hvis man foretager beregninger af daglige Manningtal på grundlag af lange tidsserier af hydrometriske data, og man i disse beregninger anvender samme opmålingsdata, så vil stedfundne, men ikke registrerede og i beregningerne inddragne fysiske forandringer komme til udtryk som ændringer af Manningtallet.

at stemme overens med målte vandstande, er nødt til at "fodre" beregningerne med urealistiske Manningtalsværdier. Betydningen af opmålingens detaljeringsgrad er aftagende med stigende vandløbsstørrelse, idet breddernes og bundens form og topografi vurderes at have mindre effekt på det strømmende vand, jo større vandløbet er, og jo større en del af vandet, der strømmer uden kontakt med bunden og bredderne. Den mulige betydning af profilets form for vandets frie løb taler for, at der i forlængelse af denne faglige udredning gennemføres en særskilt udredning af formruhedens størrelse og betydning for vandføringsevnen og beregninger af denne.

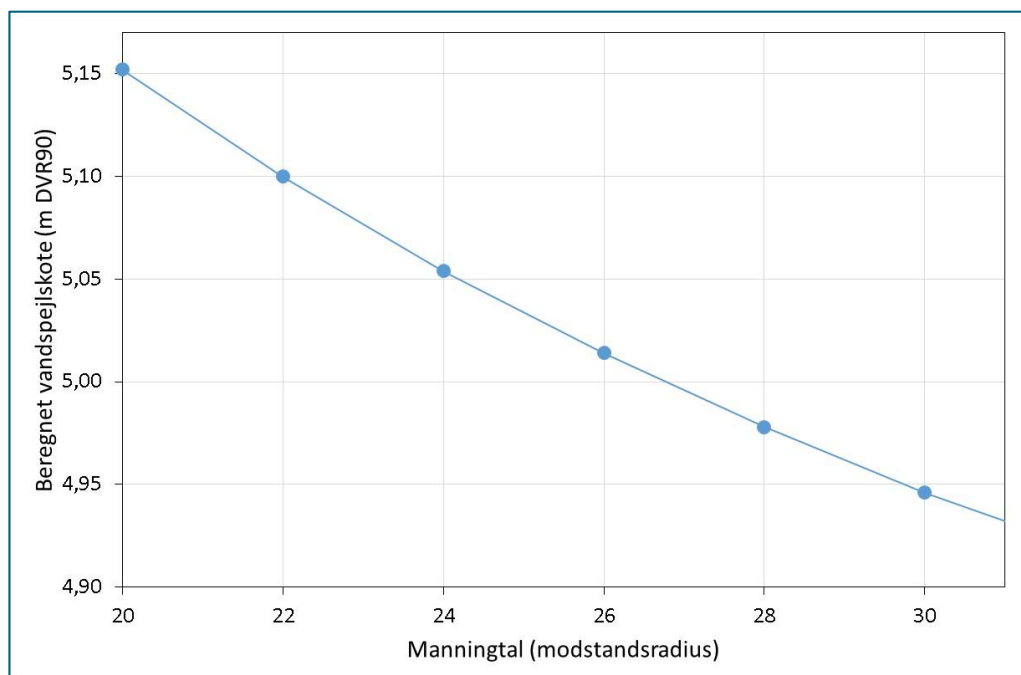
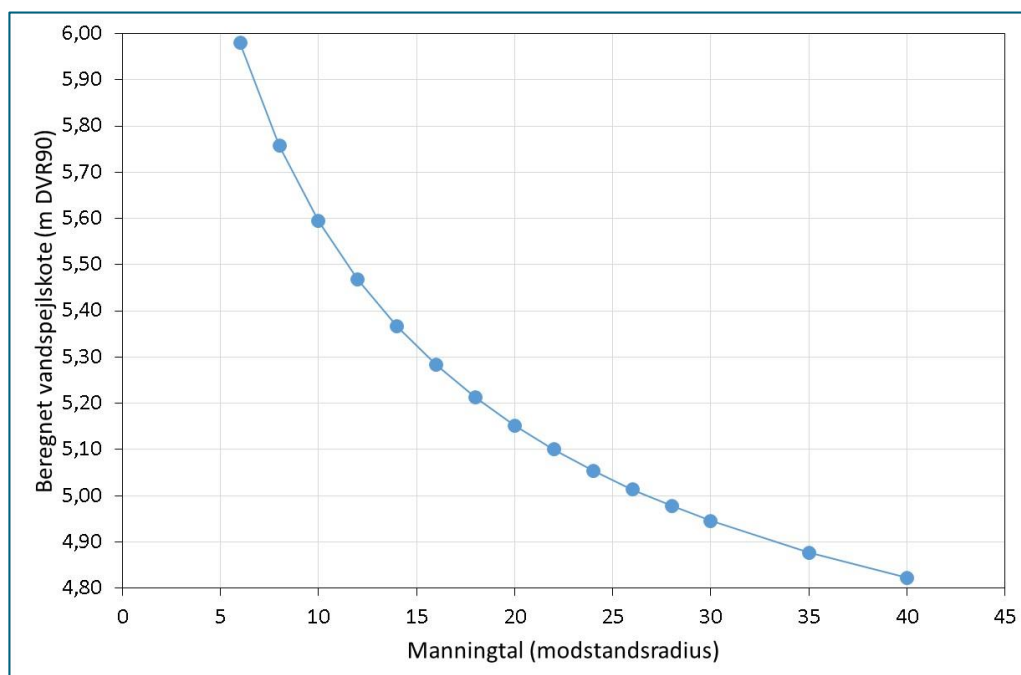
Samlet set betyder alt dette, at Manningtallet er den parameter i vandspejlsberegninger, som det er vanskeligst at få hold på. Det gælder både i de situationer, hvor man har grundlag for at beregne Manningtallet og i særdeleshed i de situationer, hvor man er henvist til at "gætte" størrelsen af det Manningtal, man skal lægge til grund for beregningerne.

Erfaringerne viser, at det er en endog meget vanskelig opgave at "gætte" Manningtal ud fra visuelle betragtninger af grøden og vandløbenes form og bundforhold, selv for meget erfarne fagfolk. Og det kan have betydende konsekvenser for vandspejlsberegningerne at "gætte" blot nogle få enheder forkert, eller at anvende beregnede værdier, som af tidmæssige eller rumlige årsager afviger fra de faktiske værdier med blot nogle få enheder, se figur 4.8.

Dette problem er størst, når det gælder små værdier af Manningtal, som er typiske for vandløb med veludviklet grøde. Er det faktiske Manningtal i et grøderigt vandløb eksempelvis 8 og man gætter på 6 eller 10, rammer man 25% under eller over den faktiske værdi, hvilket har betydende konsekvenser for resultaterne af vandspejlsberegningerne. Er det faktiske Manningtal derimod 20, og man gætter 2 enheder over eller under, rammer man kun 10 % ved siden af, hvorfor konsekvenserne for vandspejlsberegningerne vil være langt mindre.

Idet Manningtallet er et udtryk for vandhastigheden i vandløbene, og idet vandstanden er omvendt proportional med vandhastigheden¹¹, er det indlysende, at selv en lille forskel mellem det anvendte Manningtal og det faktiske Manningtal bevirker en forskel mellem den beregnede vandstand og den faktiske vandstand.

¹¹ Jo lavere vandhastighed desto højere vandstand. Denne relation mellem vandhastighed og vandstand skyldes, at en given vandføring kræver større gennemstrømningsareal, jo lavere vandhastigheden er. Og idet gennemstrømningsarealet kun kan øges op efter i et vandløbsprofil med fast bund og faste sider, betyder aftagende vandhastighed, eksempelvis som følge af grøde, at vandstanden stiger. Når man skærer grøde, øger man vandhastigheden, hvorved det nødvendige gennemstrømningsareal mindskes og vandstanden falder.



Figur 4.8. Grafisk fremstilling af Manningtallets betydning for den beregnede vandspejlskote i Simested Å station 22.070. Grafen viser beregnede vandspejlskoter ved opmålte dimensioner, Øverst i et bredt interval af Manningtal, nederst i den del af intervallet, der er mest relevant i forhold til kontrolberegninger. Beregningerne er gennemført ved anvendelse af årsmiddelaflstrømningen. Bemærk: de viste grafer gælder kun for den viste vandløbsstation og kan ikke tages som udtryk for vandspejlsberegningers generelle følsomhed over for korrekt valg af Manningtal.

Denne kendsgerning gør, at man i beregninger af resulterende vandstande, hvad enten det sker i forbindelse med projektering af fysiske indgreb i vandløb (restaureringsindgreb mv.) eller det drejer sig om en ønsket ændring af grødeskæringen, er underlagt begrænsninger på nøjagtigheden.

Disse begrænsninger betyder, at man i mange tilfælde, og særlig de tilfælde, hvor der findes grøde i vandløbene, ikke kan forvente, at beregnede vandstande stemmer fuldstændig overens med de vandstande, der kan observeres efter en given vandløbsrestaurering eller praktisering af en bestemt ændring af grødeskæringen.

Når dette er sagt, er det dog vigtigt at pointere, at mange gennemførte vandspejlsberegninger i forbindelse med både vandløbsrestaurering og grødeskæring viser, at forskellen mellem beregnede værdier og faktiske værdier i langt de fleste tilfælde er lille og ubetydelig, og at afvigelsen lige så vel kan skyldes, at de faktiske vandstande måles ved eksempelvis en anden vandføring, end den der ligger til grund for beregningerne.

Betydningen af usikkerheden på Manningtallet mindskes yderligere, hvis man alene er interesseret i den vandstandsmæssige effekt af en given indsats, det vil sige hvis man alene er interesseret i forskellen mellem vandstande.

Det leder frem til følgende sammenfatning af de beregningsmæssige forudsætninger, der knytter sig til Manningtallet:

Manningtallet er den af samtlige parametre i vandspejlsberegninger, som det er sværest at få hold på, både tidsmæssigt og rumligt, dels fordi parameteren ikke kan måles direkte, og dels fordi parameteren udviser stor tidslig og stedlig variation. Selvom man strækningsvis kan beregne Manningtal med stor sikkerhed på grundlag af eksisterende hydrometriske data, kan man ikke med samme sikkerhed forudsige fremtidige Manningtal i forbindelse med projekterede ændringer i vandløb. Men ved at benytte eksisterende viden og erfaringer kan man i de fleste tilfælde begrænse forskellen mellem beregnede værdier og faktiske værdier til acceptable niveauer. Men det er ikke realistisk at stille krav om fuldstændig overensstemmelse mellem beregnede og faktiske vandstande, særlig ikke i vandløb med grøde, hvor Manningtallet er under stadig forandring som følge af grødens vækst og henfald.

4.2.4 Konklusion

Gennemgangen af de parametre, der indgår i vandspejlsberegninger ved hjælp af Manningformlen, giver anledning til at konkludere, at nøjagtigheden et godt stykke hen ad vejen kan optimeres gennem omhyggelige opmålinger af vandløbenes fysiske form og ved brug af retvisende vandføringsdata.

Men gennemgangen viser også, at vandspejlsberegninger - selv ved benyttelse af detaljerede og retvisende opmålings- og vandføringsdata – altid vil være behæftet med en vis usikkerhed, der dels skyldes måleusikkerheden på data, og som dels – og ikke mindst – skyldes usikkerheden på Manningtalsbestemmelsen.

Sidstnævnte kan efterlade det indtryk, at usikkerheden på vandspejlsberegninger er så stor, at beregnede vandstande ikke er retvisende og derfor uanvendelige. Men sådan forholder det sig heldigvis ikke, idet der findes mange eksempler på, at beregnede vandstande ligger meget tæt på de faktiske vandstande. Og det forholder sig ydermere sådan, at jo flere situationer, hvor man har både beregnede og målte vandstande, desto bedre bliver vidensgrundlaget for fremtidige vandspejlsberegninger. Betydningen af usikkerheden mindskes yderligere, hvis man alene er interesseret i forskellen mellem beregnede vandstande.

5. VANDFØRINGSEVNEBESTEMTE REGULATIVER

I forbindelse med vedtagelsen af den "nye" vandløbslov i 1982 blev lovens formålsparagraf ændret. Mens formålet i den tidligere vandløbslov alene var at sikre afledningen af vand, er formålsparagraffen i den nugældende vandløbslov mere nuanceret og lyder:

§ 1. Ved denne lov tilstræbes at sikre, at vandløb kan benyttes til afledning af vand, navnlig overfladevand, spildevand og drænvand.

Stk. 2. Fastsættelse og gennemførelse af foranstaltninger efter loven skal ske under hensyntagen til de miljømæssige krav til vandløbskvaliteten, som fastsættes i henhold til anden lovgivning.

Indtil vedtagelsen af den nugældende vandløbslov opererede de lovbestemte vandløbsregulativer udelukkende med geometrisk skikkelse, hvor krav om en bestemt form, typisk trapezform, som minimum skulle være opfyldt i forbindelse med kontrolopmålinger, for at regulativets bestemmelser om skikkelsen kunne anses for opfyldt.

Som noget nyt blev det med vedtagelsen af den nugældende vandløbslov indført, at et vandløbsregulativ skal indeholde bestemmelser om vandløbets skikkelse **eller** vandføringsevne.

Vandføringsevne

Mens det er nemt at forstå og kontrollere bestemmelser om en bestemt skikkelse, eks. med trapezformet tværsnit, er begrebet vandføringsevne mere abstrakt.

Vandføringsevnen beskrives gennem en række af sammenhørende værdier af vandføring (Q) og vandstand (H).

Den profilbestemte vandføringsevne, der er udtryk for vandløbenes grundlæggende evne til at lede vandet, beskrives enten i tabeller med sammenhørende Q og H værdier eller mere typisk på grafisk form med Q/H-kurver.

I bemærkningerne til lovforslaget står der, at hvor målsætningen for vandløbet er høj miljøkvalitet, vil der samtidig være krav om varierende bredde og dybde, hvorfor fastsættelse af en bestemt skikkelse vil være i strid med målsætningen. For vandløb med en målsætning om høj miljøkvalitet vil det være formålstjenligt i stedet at tilstræbe en bestemt vandføringsevne uden samtidig krav til skikkelsen.

I forlængelse af lovændringen ønskede man derfor at udvikle regulativtyper, der ikke fastholder vandløbene i en bestemt trapezform, men som derimod tillader udvikling af andre, mere naturlige former og forløb inden for rammerne af besluttede krav til vandføringsevnen.

Ved regulering af vandløb har man almindeligvis tilsigtet at skabe så retlinede, ensartede og glatte vandløb som muligt, typisk med et trapezformet tværsnit, hvis dimensioner og beliggenhed i terrænet blev fastlagt på grundlag af forudgående beregninger, hvori indgik både den naturgivne afstrømning og den ønskede afvandingsdybde. Således regulerede vandløb er typisk blevet vedligeholdt efterfølgende med sigte på at fastholde den oprindelige form og de dermed forbundne hydrauliske egenskaber, alene med det sigte at opfylde Vandløbslovens bestemmelser om afledning af vand.

Med baggrund i Miljøbeskyttelsesloven fra 1973 og EU's Fiskevandsdirektiv blev der i 1970'erne vedtaget miljømålsætninger for en stor del af de danske vandløb, hvoraf hovedparten på det tidspunkt var blevet reguleret og vedligeholdt med ensidigt sigte på vandafledningen. Det kom hurtigt til at stå klart for de ansvarlige myndigheder, at disse målsætninger ikke kunne opfyldes i vandløb med retlinede, ensartede og glatte profiler, primært fordi sådanne vandløb har en meget udtalt mangel på den fysiske variation og (dynamiske) stabilitet, som det naturlige dyre- og planteliv i vandløbene kræver.

Dette modsætningsforhold mellem Vandløbslovens bestemmelser om vandafledningen og Miljøbeskyttelseslovens bestemmelser om miljøtilstanden var baggrunden for, at der i Vandløbsloven fra 1982 blev tilføjet en bestemmelse om, at foranstaltninger til sikring af vandafledningen gennem vandløbene skulle ske under hensyntagen til de vedtagne miljømålsætninger.

Det var i perioden forud for lovens vedtagelse, at det for alvor blev erkendt, at en af de meget vigtige forudsætninger for et veludviklet plante- og dyreliv i vandløbene er tilstedeværelsen af fysisk variation – en forudsætning der ikke er opfyldt i retlinede, ensartede og glatte samt regelmæssigt vedligeholdte vandløb, der administreres efter et skikkelsesregulativ.

Denne erkendelse er baggrunden for, at man i forbindelse med af vedtagelsen af den nugældende vandløbslov indførte muligheden for i regulativerne at operere med krav til vandføringssevnen i stedet for krav til skikkelsen. Man definerer i de såkaldte Q/H-regulativer vandføringssevnen som vandløbenes evne til at aflede forskellige vandføringer inden for specificerede vandstandsmæssige rammer. Senere udviklede man regulativtypen "teoretisk skikkelse", der også opererer med krav til vandføringsevnen, men på en måde, så regulativtypen ikke kan betragtes som et "ægte" vandføringsevne-regulativ.

Begge disse regulativtyper muliggør fastlæggelse af specifikke krav til vandføringsevnen samtidig med at de tillader udvikling af den fysiske variation, der er en forudsætning for opfyldelse af de vedtagne miljømålsætninger. Det er baggrunden for, at de to sidstnævnte regulativtyper finder anvendelse for vandløb med en miljømålsætning, mens skikkelsesregulativer især finder anvendelse for vandløb uden eller med lempede krav til miljøtilstanden.

Betydningen af de fysiske forhold for miljøtilstanden er i de senere år blevet yderligere accentueret, idet flertallet af de virkemidler, der opereres med i regi af Vandområdeplanen, retter sig mod forbedring af den fysiske vandløbskvalitet, det vil sige mod genskabelse af den fysiske variation, der gik tabt ved reguleringen.

5.1. Q/H-regulativer

Regulativer af Q/H-typen¹² blev i stigende grad ibrugtaget i forlængelse af ikrafttræden af den nugældende vandløbslov, idet forvaltning af vandløbene efter Q/H-princippet tillader den formudvikling, der er nødvendig for opfyldelse af de besluttede miljømål.

I denne regulativtype fastsættes der en række Q/H-stationer i vandløbet. Hver station skal sikre, at vandføringsevnen på den nedstrøms strækning skal kunne kontrolleres.

¹² QH-princippet bliver udelukkende anvendt til at beskrive sammenhængen mellem vandføring og vandstand i grødefrie vandløb, det vil sige at QH-kurverne beskriver vandløbenes basale vandføringsevne, bestemt alene af de fysiske forhold. Det har dog i nyere tid vist sig, at den grødefrie tilstand ikke eksisterer i mange vandløb, bl.a. fordi der ikke vinterklargøres i samme omfang som tidligere.

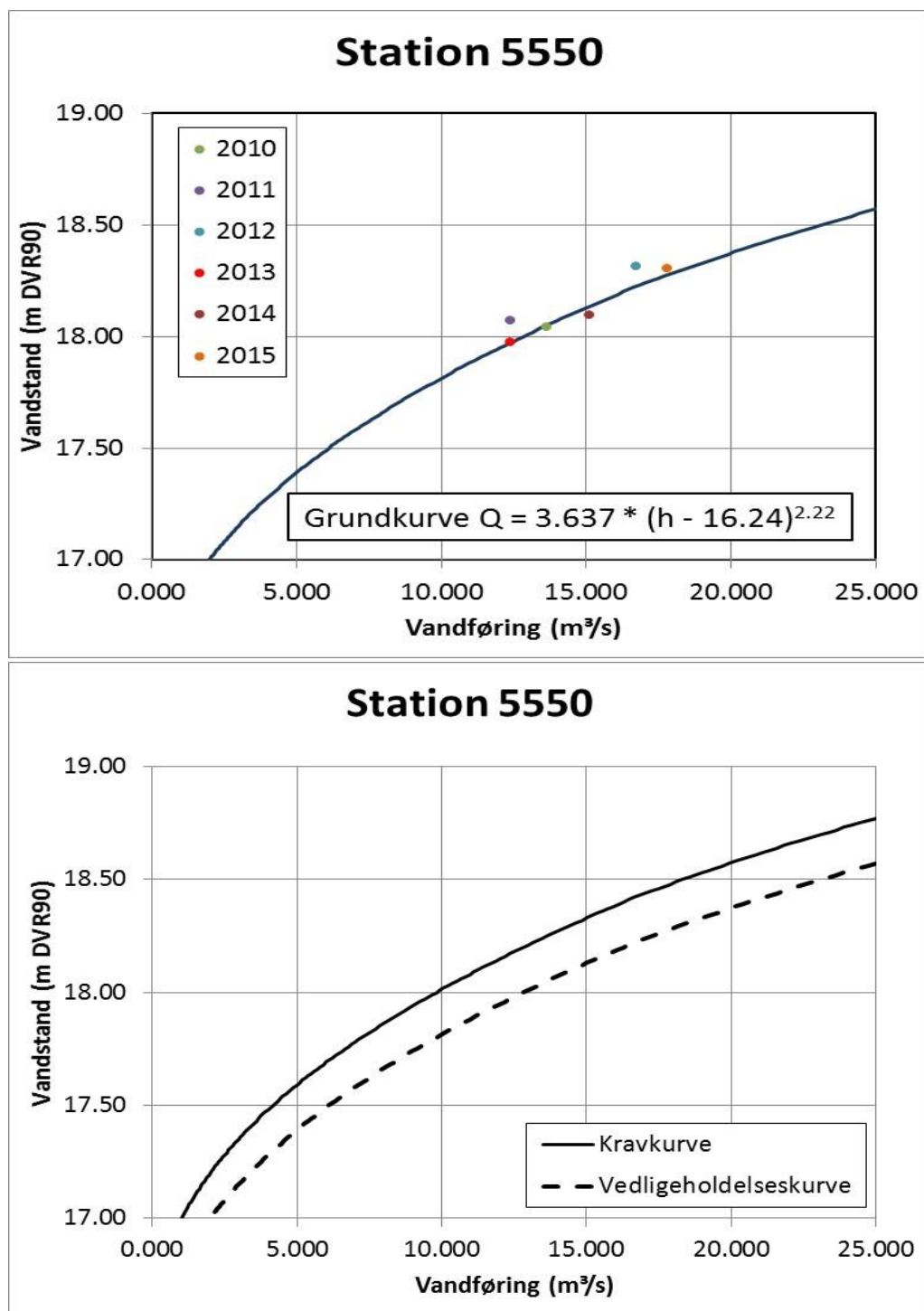
Q/H-stationer skal derfor placeres med en sådan tæthed, at stationerne til sammen giver et retvisende billede af vandføringsevnen i vandløbene eller på strækninger af disse.

For hver af Q/H-stationerne udarbejdes der en kravkurve og en grundkurve (vedligeholdelseskurven), se Figur 5.1. Grundkurverne udarbejdes almindeligvis på baggrund af en lang serie af vandspejlsdata inden for et repræsentativt spænd af vandføringer. Som inputdata anvendes enten den tidligere regulativmæssige skikkelse eller en ny opmåling af vandløbet. Samtidig er der ofte lavet en Manningtalsbestemmelse på de enkelte strækninger, og det er disse Manningtal, der ligger til grund for vandspejlsberegningerne og de deraf udledte Q/H-kurver. Grundkurven beskriver således sammenhængen mellem vandstand og vandføring i det grødefrie vandløb.

Det er vigtigt, at der er et tilstrækkeligt antal Q/H-stationer, således at hele vandløbets vandføringsevne kan kontrolleres retvisende. Der må derfor ikke være længere mellem kravkurvestationer, end at en betydende aflejring eller indsnævring ved kontrollen vil komme til udtryk som en målelig vandspejlsstigning på nærmeste opstrøms Q/H-station.

Hvor langt der skal være mellem de enkelte stationer, afhænger blandt andet af vandløbets faldforhold. Jo mindre fald på vandløbet, desto længere oppe kan effekten af en aflejring aflæses på skalapælen, hvorfor der i vandløb med ringe fald kan være langt mellem stationerne.

Kravkurverne fastlægges typisk ved at forskyde grundkurven et antal cm opad. Det svarer til, at der i mange geometriske regulativer tillades en aflejring (bundhævning) på 10 cm, inden der iværksættes oprensning. Vedligeholdelse udløses senest, når kravkurven er overskredet, og vedligeholdelsen må ikke forbedre vandføringsevnen mere end til grundkurveniveauet.



Figur 5.1. Eksempel på Q/H-krav- og vedligeholdelseskurver. Når man kender vandføringen kan den maksimalt tilladte vandstand aflæses. På den øverste figur er vist sammenhørende værdier af Q og H, tilvejebragt ved kontrolmålinger gennem en årrække. På den nederste figur er vist kravkurven, der er bestemmende for, hvornår der skal iværksættes oprensning, mens vedligeholdelseskurven (eller grundkurven) angiver grænsen for oprensningens omfang. Bemærk: figurerne angiver vandføringen ved brug af decimalpunktum.

Kontrollen af om regulativets bestemmelser er opfyldt, foregår ved, at der i den grødefrie periode¹³ (sene vinterhalvår) foretages bestemmelse af vandføringen og aflæsning af den tilhørende vandstand på hver af Q/H-stationerne.

På den øverste del af Figur 5.1 ses resultaterne af kontrolmålinger af Q og H udført i årene 2010-2015. Kontrollerne er udført ved vandføringer på 12-18 m³/sek, hvilke alle er relativt høje vandføringer for stationen. Det ses endvidere, at de udførte kontroller ligger meget tæt på grundkurven, bortset fra i årene 2011 og 2012, hvor de målte vandstande ligger lidt over grundkurven, men ikke over kravkurven.

Er den målte vandstand på en station højere end kravkurven tillader for den tilhørende vandføring, skal der typisk renses op på den nedstrøms strækning¹⁴, dog ikke mere end at vedligeholdelseskurven ikke underskrides. Forskellen mellem krav- og grundkurven svarer som tidligere nævnt til, at der i et traditionelt skikkelsesregulativ typisk skal være mindst 10 cm aflejringer, førend de udløser oprensning, ligesom der også gælder bestemmelser om, hvor langt under regulativmæssig bund, der må graves for at sikre at vandløbet ikke bliver overuddybet i forhold til regulativet.

Ved kontrollen af Q/H-bestemmelserne er det vigtigt, at det er vandløbets fysiske skikkelse, der kontrolleres, og ikke kombinationen af skikkelse og grødevækst. Det er årsagen til at terminen for kontrol typisk ligger omkring marts måned.

Det er imidlertid erfaringen, at langt fra alle vandløb er grødefrie i kontrolperioden. Vokser der grøde nedstrøms en kravstation i perioden for kontrollens udførelse, kan Q/H-kravet være overskredet – ikke (nødvendigvis) som følge af aflejringer, men mere sandsynligt som følge af, at grøden forårsager forhøjet vandspejl.

Når kravkurven viser sig at være overskredet¹⁵, kan det derfor være vanskeligt umiddelbart at afgøre, hvad der er årsag til overskridelsen – profilændringer, aflejringer og/eller overvintrende grøde? Denne vanskelighed er en af de alvorlige svagheder ved Q/H-regulativer – det er nemt at konstatere en overskridelse, men det er vanskeligt at identificere årsagen(-erne) til overskridelsen, og derfor vanskeligt at foretage den rette korrigerende indsats.

Et andet problem ved kontrol af Q/H-bestemmelser kan være, at kontrolmålingerne, i bestræbelserne på at ramme den mest grødefrie tilstand, foretages i det tidlige forår, hvor vandføringen almindeligvis er relativt stor. Med den fremgangsmåde kontrolleres vandløbets regulativmæssige vandføringsevne ved én vandstand, uden at man derved

¹³ Der har i mange år været gjort en antagelse om, at vandløb er grødefrie om vinteren. Den antagelse har i mange tilfælde vist sig ikke at holde i virkelighedens vandløb, hvoraf mange huser overvintrende grøde. I stedet for betegnelsen i grødefri tilstand bør man rettelig benytte betegnelsen i vintertilstand, og i beregningerne tage højde for, at vintertilstanden i mange vandløb indbefatter overvintrende grøde.

¹⁴ Der kan i henhold til afgørelse fra Natur- og Miljøklagenævnet argumenteres for, at oprensning skal gennemføres senest lige før, der sker overskridelse af kravkurven. En sådan praksis kræver imidlertid en anden form for kontrolpraksis, end den, der finder sted i dag med én årlig kontrol.

¹⁵ Det tilstræbes almindeligvis at undgå overskridelse af kravkurven, men eftersom kontrollen af vandførings- evnen typisk foregår med mindst ét års intervaller, kan der selv i en så kort periode ske ændringer, som afføder en overskridelse af kravkurven.

får information om vandføringsevnen ved andre vandstande. Det kan især være et problem i forhold til at give en retvisende beskrivelse af vandføringsevnen ved et bredere interval af de vandstande, der er relevante i forhold til afvandingsinteresserne¹⁶.

Det er yderligere et problem, at det i tilfælde af overskridelse af kravkurven er vanskeligt at kvantificere den indsats, der er nødvendig for at bringe vandføringsevnen i overensstemmelse med regulativbestemmelserne. Typiske aflejringer kan ofte erkendes og oprenses på øjemål, men hvis vandløbet gennem årene er blevet smallere, er det mere vanskeligt at erkende endsige målrette og kvantificere den nødvendige indsats.

Da oprensning, udløst af kravkurveoverskridelse i det tidlige forår, normalt først gennemføres efter høst i det tidlige efterår, er det vanskeligt at kontrollere, om der er rensed for lidt eller for meget op i forhold til regulativets krav- og vedligeholdelseskurver, idet vandløbet på oprensningstidspunkt almindeligvis ikke er grødefrit. Det vil i tvivlstilfælde ikke være muligt at udføre en brugbar Q/H-kontrol på oprensningstidspunktet. Det forhold, at Q/H-regulativer kun kan kontrolleres i den grødefrie periode, kan også skabe problemer, hvis der ønskes en hurtig afklaring af, om regulativets bestemmelser er overholdt, idet kontrollen kun kan udføres i den grødefrie periode.

Endelig er Q/H-princippet vanskeligt at forstå for brugerne af vandløbene, hvortil kommer, at mulighederne for selv at kontrollere om regulativets bestemmelser er opfyldt, er begrænsede af, at de færreste har mulighed for selv at udføre vandføringsbestemmelser.

Som før nævnt skal en betydende aflejring kunne erkendes oppe ved kravkurvestationen som en vandspejlsstigning, for at der ved kontrollen viser sig at være et oprensningsbehov. Der må således ikke være for langt mellem de enkelte kravstationer. Hvis et vandløb har gode faldforhold og dermed må formodes at kunne holde sig selv fri for aflejringer, vil kravkurvestationer skulle placeres relativt tæt, idet en aflejring netop på grund af de gode faldforhold ikke kan erkendes særligt langt opstrøms i vandløbet. Det behøver dog ikke nødvendigvis være et problem, såfremt en målt vandføring kan bruges til at bestemme vandføringer på længere strækninger, således at det kun er en skala-aflæsning eller GPS-måling af vandstanden, der er behov for.

Ovenstående svagheder ved Q/H-princippet er først og fremmest af formidlingsmæssig og administrativ karakter, men kan også indebære problemer i de tilfælde, hvor vandløbet er blevet bredere og bunden kommet til at ligge højere, uden at det er gået ud over den fastsatte vandføringsevne. Hvis vandløbets bundkote med tiden hæves samtidig med at vandløbet bliver bredere, kan det have betydning for afvandingsstanden, og et sådant problem fanges ikke nødvendigvis gennem regulativkontrollen ved de høje forårsafstrømninger.

Regulativtypen er udviklet til brug for vandløbsstrækninger, hvor de miljømæssige hensyn vægter højt. Det sker ved at tillade vandløbene at udvikle de varierede dybde- og

¹⁶ Problemet med at fastlægge kravkurven på grundlag af et bredt spektrum af samhørende Q- og H-værdier har som årsag, at vandføringen i perioden med mindst grøde i vandløbene almindeligvis er høj, hvorfor man ikke eller kun sjældent oplever middelstore og små vandføringer.

bundforhold mv., som er forudsætninger for at Vandområdeplanens målsætninger kan opfyldes. Regulativtypen understøtter dermed vandløbsloven formålsparagraf, nemlig at vandløb skal kunne aflede vand under hensyntagen til miljømålsætningerne og -værdierne. Regulativtypen har imidlertid en række faglige og forvaltningsmæssige svagheder, der allerede kort efter udviklingen og ibrugtagningen af Q/H-princippet skærpede interessen for, om der kunne formuleres et andet princip, der kunne give den samme eller bedre hensyntagen til miljøinteresserne, og samtidig løse nogle af de praktiske problemer, der knytter sig til Q/H-princippet.

Hvis det er muligt at overføre og omregne en målt vandføring på udvalgte stationer til hele vandløbet, kan kontrollen af denne regulativtype typisk udføres med et mindre ressourceforbrug, end hvad der er tilfældet for regulativtyper, der kræver en detaljeret opmåling med tværprofiler.

Q/H regulativer kan ikke bruges i stuvningspåvirkede vandløb.

5.2. Teoretisk skikkelse

I jagten på funktionelle alternativer til Q/H-princippet er der gennem årene formuleret forskellige andre principper, hvoraf nogle viste sig ikke at kunne opfylde vandløbslovens krav om, at der skal foreligge entydige og kontrollerbare bestemmelser om vandløbenes skikkelse eller vandføringsevne.

Det i dag mest udbredte alternativ til Q/H-princippet, er regulativtypen "Teoretisk Skikkelse", der trods navnet er at betragte som en art vandføringsevne-regulativ.

Brugen af teoretisk skikkelse som forvaltningsgrundlag har til formål at tillade formudvikling i vandløbene og samtidig muliggøre en nemmere og mere operationel tilgang til kontrollen af vandføringsevnen og oprensningsbehovet, end tilfældet er i Q/H-regulativer.

Ideen med teoretisk skikkelse er at tillade et vandløb at antage og udvikle naturlig form og varieret fysisk tilstand i så vid udstrækning, det er muligt, uden at de resulterende vandstande overskrider de vandstande, der ville have været, hvis vandløbet havde haft en geometrisk skikkelse med samme ruhedsforhold. Ideen med teoretisk skikkelse er dermed at komme ud over de formmæssige begrænsninger, som brugen af skikkelsesregulativer indebærer i forhold til opfyldelse af de besluttede miljømålsætninger.

Selvom udenlandsk litteratur peger på, at vandløbenes fysiske form og profilkarakteristika har betydning for strømningsmodstanden, og at der er en Manningtalsmæssig forskel mellem retlinede, ensartede og glatte vandløb og vandløb med bugtet forløb og uregelmæssig

profil, så har det ikke inden for rammerne af denne redegørelse været muligt at godtgøre endsige kvantificere betydningen af fysisk og formmæssig variation (formruheden) for vandføringsevnen.

På den baggrund udtaler følgegruppen et ønske om, at spørgsmålet om formens og formvariationens betydning for vandets frie strømning (formruheden) søges besvaret gennem en videregående granskning af litteraturen, konsultation af inden- og udenlandske fageksperter og/eller ved gennemførelse af fuldskalaforsøg i vandløb. Formålet hermed er at få kvantificeret størrelsen af hver af Manningtallets delkomponenter (se side 19), dels for at få afklaret, om det er berettiget at anvende kun ét Manningtal ved kontrol af vandføringsevnen i vandløb, der administreres efter teoretisk skikkelsesregulativer, og dels at få afklaret, hvilke Manningtal, der skal anvendes i forbindelse med beregning af de vandstandsmæssige konsekvenser af forskellige fysiske forandringer i vandløb.

Det skal for fuldstændighedens skyld tilføjes, at i virkelighedens verden har kanaliserede og vedligeholdte vandløb med regulativtypen geometrisk skikkelse en større strømningsmodstand, end det ideelle, retlinede, glatte og ensartede vandløb har. Det er ganske enkelt ikke muligt at opretholde kanaliserede vandløb i en tilstand uden fysisk variation og grødevækst. Når man skal forholde sig til de mulige Manningtalsmæssige forskelle mellem kanaliserede vandløb med et geometrisk profil og vandløb med fysisk varieret profil og forløb, så kan man ikke blot anvende erfaringsmæssige værdier for strømningsmodstanden i retlinede, glatte og ensartede vandløb. Man må fastlægge Manningtallet ud fra, hvordan de i virkelighedens verden ser ud, og på samme måde, som man for nærværende ikke har den nødvendige viden til at fastlægge Manningtallet i fysisk varierede vandløb, har man heller ikke den nødvendige viden til at fastlægge Manningtallet i kanaliserede vandløb ud fra kendskab til vandløbenes faktiske eller mulige fysiske tilstand og karakteristika. Manglende viden om Manningtallets størrelse i relation til den fysiske form og variation gælder derfor for alle typer af vandløb, hvilket efterlader spørgsmålet om den reelle Manningtalsmæssige forskel mellem kanaliserede vandløb og fysisk varierede vandløb ubesvaret. Vi har ganske enkelt ikke den nødvendige viden til at kvantificere det samlede Manningtal ud fra dets formkomponenter, hverken i kanaliserede eller i fysisk varierede vandløb.

5.2.1 Definition

Teoretisk skikkelse opererer med bestemmelser om vandføringsevnen i en veldefineret geometrisk skikkelse som reference for vandføringsevnen i et vandløb, der af hensyn til opfyldelse af miljømålene skal have mulighed for at udvikle en varieret form og fysisk vandløbskvalitet. Det overordnede formål er således en regulativtype, der giver rammerne for god fysisk vandløbskvalitet, og som samtidig opfylder vandløbslovens krav om veldefinerede krav til vandføringsevnen.

Ved fastsættelsen af referencen i regulativer af typen teoretisk skikkelse tages der typisk udgangspunkt i den geometriske skikkelse, der var beskrevet i de tidligere skikkelsesregulativer. I fald en beskrevet geometrisk skikkelse ikke eksisterer, må en sådan beskrives på grundlag af kendskabet til vandløbet.

Målsætningen om god økologisk tilstand i vandløb indebærer helt overordnet, at tilstanden i vandløbene kun må afvige lidt fra den upåvirkede tilstand.

Det er velkendt, at god økologisk tilstand i meget høj grad er betinget af god fysisk vandløbskvalitet, foruden god vandkvalitet. Det er baggrunden for, at de fleste af vandplanens vandløbsindsatser drejer sig om forbedring af den fysiske vandløbskvalitet.

Den nære kobling mellem den økologiske tilstand og den fysiske vandløbskvalitet betyder, at vandløb, der vedligeholdes efter princippet geometrisk skikkelse, ikke kan opfylde alle de krav til fysisk vandløbskvalitet, som er forudsætningen for målopfyldelse. Den geometriske skikkelse mangler en række af de nødvendige fysiske kvaliteter, eks. varierede dybdeforhold og varieret profilform, men vandløbenes fysiske tilstand er til gengæld nem at kontrollere og nem at vedligeholde. Geometrisk skikkelse opfylder dermed vandløbslovens krav om en entydig og kontrollerbar skikkelse, men opfylder ikke målsætningernes implicite krav om varierede fysiske forhold.

Teoretisk skikkelse som regulativprincip er udviklet for at muliggøre den nødvendige udvikling af den fysiske vandløbskvalitet inden for rammerne af den vandføringsevne, man ville have i tilsvarende vandløb med geometrisk skikkelse. Teoretisk skikkelse hviler dermed på den antagelse, at en given vandføringsevne kan være til stede i vandløb med mange forskellige former, og at vandføringsevnen ikke nødvendigvis er knyttet til en bestemt geometrisk form.

Benyttelse af geometrisk skikkelse vil i mange vandløb betyde, at man ikke kan opfylde de besluttede miljømål på grund af de skikkelsesrelaterede begrænsninger af den fysiske vandløbskvalitet og udviklingen af denne. Regulativer med geometrisk skikkelse vil derfor i mange tilfælde være problematiske i forhold til opfyldelse af Vandområdeplanernes målsætninger for vandløb.

5.2.2 Udmøntning af teoretisk skikkelse i praksis

For at sikre samme vandføringsevne som i den anvendte geometriske skikkelse er der defineret to referencevandspejl, som skal være overholdt.

De to referencevandspejl skal være gældende ved en stor henholdsvis en gennemsnitlig vintervandføring, og skal sikre, at vandløbet opfylder kravene til vandføringsevnen ved både store og mere gennemsnitlige vandføringer i det interval, der er forbundet med vandstande¹⁷ af betydning for afvandingsinteresserne.

Der fastsættes ikke et referencevandspejl, der gælder ved lille vandføring. Begrundelsen er, at ruheden ved en lille vandføring er relativt stor, hvorfor vandstanden også er relativt høj. Men da vandstanden ved lille vandføring til trods herfor ligger lavt i forhold til afvandingsinteresserne, er der ikke noget behov for at stille krav til vandspejlet ved lille vandføring. Gør man det, vil man meget ofte kunne blive stillet over for, at vandspejlsberegningerne udløse krav om oprensning. En sådan oprensning vil ikke ved lille vandføring tilgodese et afvandingsbehov, og effekten af en oprensning vil kun være ringe i forhold til de større vandføringer. Til gengæld vil effekten af oprensning i forhold til vandløbsmiljøet være så stor og potentielt så ødelæggende, at det på afgørende vis kompromitterer formålet med at benytte teoretisk skikkelse.

¹⁷ Det er vandstanden, der har relevans i forhold til afvandingsinteresserne. Benyttelsen af den gennemsnitlige vandføring og medianmaksimumsvandføring i vinterperioden er begrundet i, at disse to karakteristiske vandføringer almindeligvis korresponderer med vandstande, der har betydning for afvandingsinteresserne, dels i forhold til afvandingsdybden og dels i forhold til oversvømmelse.

Følgegruppen anerkender, at kontrolberegninger af vandføringsevnen ved middelhøje og høje vandstande sigter mod at opretholde en vandføringsevne, der tilgodeser afvandingsdybden og begrænser oversvømmelsesrisikoen. Sådanne beregninger sikrer imidlertid ikke mod formforandringer i bunden af profilet, som kan være til gene for drænenes uhindrede udledning af vand. Hvorfor en måde at tilgodese drænenes udløb kan være at supplere med kontrolberegninger ved lave vandstande/små vandføringer.

Følgegruppen anerkender, at der kan være ulemper ved en sådan fremgangsmåde, eksempelvis at kontrolberegninger ved små vandstande/vandføringer kan udløse oprensninger, der kompromitterer formålet med regulativtypen. Følgegruppen anerkender på den baggrund, at det af hensyn til drænenes udløb vil kunne være tilstrækkeligt, hvis det på anden vis tilsikres, at dele af vandløbsprofilet ligger i eller under regulativmæssig bund og derigennem giver mulighed for, at drænenes munding kan friholdes for tildækning med aflejringer.

Kontrollen af kravopfyldelsen i regulativer med teoretisk skikkelse fungerer på denne måde:

Som ved et regulativ med bestemmelser om geometrisk skikkelse foretages der ved kontrol af vandføringsevnen en opmåling af vandløbet. På baggrund af opmålingen og de i regulativet fastsatte afstrømningsværdier og Manningtal, foretages der beregning af det resulterende vandspejl ved de to afstrømninger. De valgte afstrømninger er typisk vintermiddel og vintermedianmaksimum.

Samme beregninger foretages for regulativets beskrevne teoretiske geometriske skikkelse.

Ved vurderingen af, om vandføringsevnen i det faktiske vandløb er i overensstemmelse med regulativbestemmelserne gælder, at hvis det beregnede vandspejl på baggrund af opmålingsdata ligger på niveau med eller lavere end det beregnede vandspejl i det geometriske profil, da betragtes vandføringsevnen som værende i overensstemmelse med regulativbestemmelserne. Og omvendt, hvis det beregnede vandspejl i det opmålte profil ligger over det beregnede vandspejl i det geometriske profil, skal der foretages oprensning. Vandspejlskravene skal være opfyldt ved begge afstrømninger.

I mange regulativer med teoretisk skikkelse er der fastsat en bestemmelse om, at overskridelser af referencevandspejlene skal være på 10 cm eller mere, førend der iværksættes oprensning. Denne margin er begrundet i skikkelsesregulativernes krav om, at aflejringer skal være større end eks. 10 cm, førend det udløser oprensning.

I henhold til Vandløbsloven gælder, at et vandløbs vandføringsevne ikke må ændres. I gamle regulativer udløste bundaflejringer på eksempelvis 10 cm oprensning. Især i små vandløb vil en aflejring på eks. 10 cm forårsage en vandspejlshævning, der er mindre end 10 cm. Omvendt vil en vandspejlshævning på eks. 10 cm dække over en bundhævning, der

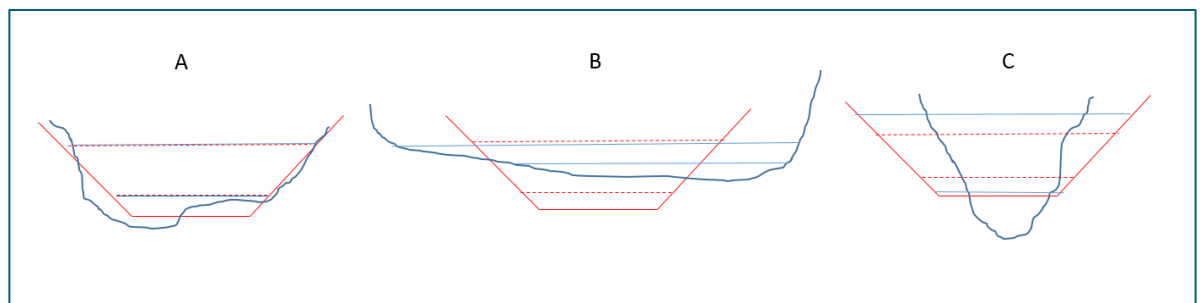
er større end 10 cm. For at fastholde den vandføringsevne, der er fastsat i de gamle regulativer, skal man derfor benytte bundhævning som kriterium for oprensning frem for vandspejlshævning.

Følgegruppen nikker med baggrund i rapportens afsnit 6.1.1.3 og bilag 1.3 vedr. bundhævning vs. vandspejlshævning til, at man fremover benytter en specificeret bundhævning som kriterium for, hvornår der skal foretages oprensning i vandløb, frem for, at en sådan foretages på grundlag af en specifik vandspejlshævning.

Teoretisk skikkelse har i forhold til Q/H-princippet nogle fordele i henseende til den praktiske kontrol af vandføringsevnen.

Først og fremmest kan kontrollen foregå på alle årstider, da det er vandløbets fysiske form der opmåles og kontrolleres. Det betyder således ikke noget, om der er grøde i vandløbet på kontroltidspunktet, så længe grøden ikke forhindrer en retvisende opmåling af det fysiske profil. Viser opmålingen og de efterfølgende kontrolberegninger af vandspejlet, at regulativets bestemmelser ikke er opfyldt, vil et oprensningsbehov relativt let kunne beskrives, idet den opmålte skikkelse kan sammenlignes med den teoretiske geometriske skikkelse ved at udtegne tværprofiler af opmåling sammenholdt med den teoretiske skikkelse, jf. figur 5.2. Der kan ved denne sammenstilling ses hvad forskellene på de faktiske profiler og den teoretiske skikkelse er så det kan afgøres om forskellen skyldes aflejringer i bunden eller en indsnævring af profilet.

Fremgangsmåden er illustreret i figur 5.2.



Figur 5.2. Eksempler på kontrol af vandføringsevne i vandløb, der administreres efter princippet "teoretisk skikkelse". Det røde profil viser den teoretiske skikkelse, mens det blå profil viser det faktiske opmålte vandløbsprofil. De røde stiplede linjer angiver de beregnede vandspejl for den teoretiske skikkelse, mens de blå linjer angiver det beregnede vandspejl for det opmålte tværprofil. I figur A ses, at vandføringsevnen ved gennemsnitlige og store afstrømninger er identiske i det opmålte profil og den teoretiske skikkelse, idet de beregnede vandspejl er sammenfaldende. Figur B viser, at det opmålte brede profil opfylder kravet til vandspejlet ved den høje afstrømning, men ikke ved den gennemsnitlige afstrømning, hvilket skyldes, at vandløbets bund ligger noget over den teoretiske skikkelses bund. Figur C viser, at det opmålte profil opfylder vandspejlskravet ved den gennemsnitlige afstrømning, hvilket skyldes, at det faktiske vandløb er dybere end den teoretiske skikkelse. Det opmålte profil opfylder til gengæld ikke kravet ved den høje afstrømning, da vandløbet er noget smallere end den teoretiske skikkelse.

I scenarie A afviger det faktiske profil i form fra den teoretiske skikkelse, men vandføringsevnen ved både høj og gennemsnitlig vinterafstrømning er den samme i de to profiler. Det hænger sammen med, at vandløbet er dybere end den teoretiske skikkelse i den ene side, hvilket kompenserer for aflejringerne i den anden side af vandløbet.

I scenarie B er kravet til vandføringsevnen opfyldt ved høje afstrømninger, idet vandløbet er bredere end den teoretiske skikkelse. Derimod opfylder det beregnede vandspejl ikke det regulativmæssige krav ved den gennemsnitlige afstrømning, hvilket skyldes at vandløbet ikke er dybt nok i forhold til den teoretiske skikkelse. Her er vandspejlskravet ved den lave afstrømning med til at sikre at den afvandingstilstand, der var knyttet til den teoretiske skikkelse.

I scenarie C er kravet til vandføringsevnen opfyldt ved den gennemsnitlige afstrømning, idet vandløbet er dybere end den teoretiske skikkelse. Det beregnede vandspejl i det faktiske vandløb opfylder imidlertid ikke det regulativmæssige krav ved den højre afstrømning, da vandløbet er for smalt i forhold til den teoretiske skikkelse.

Fremgangsmåden med at kontrollere vandføringsevnen ved både høje og middelstore afstrømninger betyder, at regulativer efter princippet "teoretisk skikkelse" i højere grad end regulativer efter princippet Q/H sikrer, at den besluttede vandføringsevne er til stede i et bredere interval af vandstande.

5.3. Teoretisk skikkelse – en udbredt men ofte kritiseret regulativtype

Regulativtypen teoretisk skikkelse er i dag den mest udbredte regulativtype, der opererer med krav til vandføringsevnen.

I de senere år er der fremkommet en del kritik af regulativtypen. Kritikken kommer fortrinsvis fra brugere med afvandingsmæssige interesser, men i nogle tilfælde har også kommunale forvaltninger ytret kritik.

Kritikpunkterne er dels af faglig¹⁸ og dels af formidlingsmæssig og forståelsesmæssig karakter, hvortil kommer kritik af, at kontrollen af vandføringsevnen kræver brug af et vandspejlsberegningsprogram og en vis hydraulisk indsigt og forståelse. Herudover kan der være uenighed om selve forudsætningerne for de udførte beregninger.

I de følgende kapitler er der givet en diskussion af de kritikpunkter, der oftest er blevet fremført i forbindelse med regulativtypen teoretisk skikkelse, jf. note 19.

5.3.1 "Regulativet sikrer ikke i tilstrækkelig grad mod oversvømmelser"

Det fremføres ofte af lodsejere og deres interesseorganisationer, at regulativet ikke sikrer tilstrækkeligt mod oversvømmelser, eks. i forbindelse med afledning af regnvand fra byer. Og man hører med henvisning hertil ønsker om, at vandløbenes vandføringsevne skal forbedres i forhold til det, regulativerne foreskriver.

Denne problemstilling relaterer imidlertid ikke specifikt til regulativtypen teoretisk skikkelse, men gælder for alle regulativtyper, idet besluttede bestemmelser om geometrisk skikkelse og vandføringsevne altid vil kunne blive anset for utilstrækkelige i relation til oversvømmelse.

¹⁸ Den faglige kritik går primært på rigtigheden af, at ruheden i formmæssigt varierede vandløb er den samme som i retlinede, ensartede og "glatte" vandløb.

Det skal derfor pointeres, at det at forbedre et vandløbs vandføringsevne i henhold til vandløbslovens bestemmelser er defineret som en regulering, som kræver en særlig procedure. Det gælder for alle regulativtyper.

5.3.2 "De udførte beregninger afspejler ikke virkeligheden"

En mulig årsag til at problemstillingen om utilstrækkelig vandføringsevne meget ofte nævnes i forbindelse netop med regulativtypen teoretisk skikkelse er, at der både ved udarbejdelsen af regulativerne og ved de efterfølgende kontroller af vandføringsevnen opereres med vandspejl, der beregnes på grundlag af skønnede afstrømningsværdier og Manningtal. Disse inputdata hævdes ofte at være urealistiske og ikke retvisende for de faktiske forhold i vandløbene. Det er ofte forbindelse med et urealistisk beregningsgrundlag, at de oplevede afvandingsmæssige problemer afføder ønsker om at få tilpasset vandløbene til fremtidige klimaforandringer. Disse problematikter behandles i afsnit 7.

Denne problemstilling – "urealistiske inputdata" – rører ved det centrale spørgsmål i denne rapport – de beregningsmæssige forudsætninger.

Problemet i forhold til regulativtypen er imidlertid først og fremmest af forståelsesmæssig og formidlingsmæssig karakter, idet de valgte afstrømningsværdier og Manningtal ikke i sig selv har betydning for, om beregningerne giver retvisende billeder af vandføringsevnen¹⁹. I forhold til afvandingsinteresserne er det dog vigtigt, at de benyttede afstrømningsværdier ligger inden for det interval, hvor de korresponderende vandstande har betydning i forhold til afvandingsinteresserne. Derfor anvendes almindeligvis en gennemsnitlig og en stor vintervandføring (vintermiddel og vintermedianmaksimum)²⁰. Selvom størrelsen af det valgte Manningtal ikke er kritisk²¹, bør beregningerne dog så vidt muligt baseres på Manningtal, der er realistiske for vandløb i vintertilstand, jf. note 20 og 21.

For at imødegå denne kritik kan der derfor enten tilvejebringes mere realistiske inputdata til brug for beregningerne, og/eller der kan leveres mere omfattende oplysninger om forudsætningerne, eksempelvis i redegørelsen til regulativerne: baggrunden og formålet med kontrolberegningerne skal beskrives detaljeret, og det skal klart fremgå af redegørelsen, at beregningerne udelukkende skal bruges til at sammenligne de to skikkelsers vandføringsevne. Det skal endvidere præciseres, at formålet ikke er at beregne en fremtidig vandstand ved en given alternativ afstrømning.

Afstrømningsdata

Der er meget store forskelle på, hvilke afstrømningsdata der er tilgængelige i de enkelte vandløb, og typisk er det fortrinsvis fra større vandløb, hvorfra der findes vandføringsdata. For mindre vandløb er den tilgængelige viden om afstrømning og vandføring som oftest meget mere sparsom eller ikke eksisterende, se afsnit 4.2.2.

¹⁹ Jf. dog betydningen af formruheden, se side 19.

²⁰ Jf. dog hensynet til drænenes frie udløb.

²¹ Jf. dog betydningen af formruheden, se side 19.

De afstrømningsværdier, der er benyttet i regulativer med teoretisk skikkelse, er i nogle tilfælde fremkommet på baggrund af lange tidsserier fra det aktuelle vandløb, mens de i andre vandløb består af konstruerede tidsserier, tilvejebragt på grundlag af data fra sammenlignelige vandløb. Endelig er der regulativer, der for alle vandløb opererer med to karakteristiske afstrømninger, eksempelvis 10 og 50 l/sek/km².

For regulativtypen teoretisk skikkelse er det som nævnt ikke altafgørende, hvilke afstrømningsværdier, der lægges til grund for beregningerne, i det formålet med de to beregninger er at sammenholde to skikkelser for at se, om vandføringsevnen i den faktiske skikkelse opfylder regulativets krav til vandføringsevne. Men som tidligere nævnt er det vigtigt, at kontrollen foregår ved nogle hensigtsmæssige niveauer. Og ved blot at benytte to generelle afstrømningsværdier kan man ikke udtale sig om, hvorvidt de benyttede værdier er retvisende for de faktiske afstrømningsforhold.

Regnes der eksempelvis på en for vandløbet urealistisk stor afstrømning, vil beregningerne måske foregå ved et vandspejlsniveau, hvorpå vandspejlet måske i praksis aldrig når op. Overstiger den anvendte afstrømningsværdi den kapacitet som broer og rørlagte strækninger har, vil de resulterende beregnede vandspejlsforløb blive stuvningspåvirkede. Dermed kan aflejringer og indsnævringer, som har betydning ved mere realistiske afstrømninger, blive overset, hvorved værdien af kontrollen forsvinder.

Omvendt vil der, hvis der regnes på urealistisk lave eller meget sjældent forekommende små afstrømninger ske det, at der kun skal meget små ændringer i profilet til, førend kontrolberegningerne udløser et oprensningsbehov. I sidstnævnte tilfælde kompromiteres formålet med regulativtypen, idet den netop er udviklet til at tillade den formudvikling²², der er nødvendig for målopfyldelse. Det giver derfor god mening, at den ene kontrolafstrømning er vintermiddel, som er en vandføring, der vandstandsmæssigt har betydning for afvandingstilstanden. Samtidig er afstrømningen ikke så lille, at det affødte oprensningsbehov fastlåser vandløbene i næsten lige så stort omfang som ved geometrisk skikkelse.

Den fremgangsmåde kan betyde, at vandløbene i princippet ikke opfylder kravet til det teoretiske profils vandføringsevne ved meget lave vandføringer. Men da vandstanden sjældent er et problem i perioder med meget lave vandføringer, har det ikke nogen praktisk betydning i forhold til afvandingsdybde og oversvømmelse²³. Det er begrundelsen for at udføre kontrolberegningerne på grundlag afstrømninger, der størrelsesmæssigt er relevante i forhold til afvandingsinteresserne.

En af årsagerne til at der fra landbrugets side ønskes vandspejlsberegninger ved små afstrømningsværdier er, at en sådan kontrol vil kunne være med til at sikre, at vandløbs bundforhold og profiludvikling ikke skaber problemer i forhold til eksisterende dræn.

²² I mange vandløb med lille sommervandføring er den fysiske variation og formudviklingen af særlig betydning i forhold til miljøtilstanden, mens den lille vandføring og de dermed forbundne vandstande er af mindre betydning i forhold til afvandingsinteresserne. Oprensning på grundlag af kontrolberegninger ved små vandføringer vil derfor kunne gøre stor skade på miljøet og kun give ringe værdi for afvandingsinteresserne, jf. dog hensynet til drænenes udløb.

²³ Jf. hensynet til drænenes udløb.

Jo højere den "lave" afstrømning er sat, desto flere og større aflejringer skal der til, førend det medfører en vandspejlsstigning ud over den vandspejlsmargin på eksempelvis 10 cm, der er fastsat i mange regulativer som grænsen for, hvornår der skal renses op. Det skyldes, at vandløb typisk bliver bredere, jo højere op i profilet man kommer, hvorfor der ofte skal lidt mere end 10 cm's aflejringer til at medføre en vandspejlsstigning på 10 cm. Jf. redegørelsen om bundhævninger i afsnit 6.1.

5.3.3 "Der regnes på forkerte Manningtal"

Denne kritik er til dels sammenlignelig med problematikken omkring valget af afstrømningsværdier. Kritikken går dels på, at det anvendte Manningtal er urealistisk, og dels på, at der bør regnes på forskellige Manningtal i det faktiske henholdsvis det geometriske profil.

I det følgende diskuteres valget af Manningtal, mens spørgsmålet om benyttelse af forskellige Manningtal er diskuteret i afsnit 5.3.5.

I mange regulativer med teoretisk skikkelse benyttes der et Manningtal af størrelsen 20-25 til de sammenlignende beregninger.

Et Manningtal på 20-25 er forholdsvist højt, men svarer erfaringsmæssigt til et grødefrit vandløb (vinterhalvåret). Der regnes i kontrollen ikke på en sommersituation, da det som for Q/H-regulativerne er selve den fysiske vandløbsskikkelses vandføringsevne, der kontrolleres.

Såfremt regulativtypen havde været geometrisk skikkelse, ville kontrollen også kun omfatte selve den fysiske vandløbsskikkelse.

Om det valgte Manningtal ved brug af kun ét og samme Manningtal sættes højere eller lavere i beregningerne, er som for de valgte afstrømninger ikke i sig selv af betydning ved den regulativmæssige kontrol, idet formålet med beregningerne er at sammenligne de to skikkelsers vandføringsevne inden for realistiske niveauer.

5.3.4 "Skepsis i forhold til beregninger"

Vandspejlsberegninger i vandløb er ofte omgærdet med en betydelig skepsis, der er begrundet af, at det er meget vanskeligt at forholde sig til inputdata og gennemskue selve beregningerne. Hvortil kommer, at de færreste brugere og interessenter har mulighed for selv at gennemføre og derigennem kontrollere rigtigheden af vandspejlsberegningerne.

I de tilfælde, hvor de opmålte tværprofiler er mindre end den teoretiske skikkelse, kan det hænde, at beregninger i nogle tilfælde viser en vandspejlsstigning inden for den regulativbestemte margin på 10 cm, hvorfor oprensning kan undlades.

Dette kan være et udtryk for, som tidligere beskrevet, at der ofte skal mere end 10 cm aflejringer til at give 10 cm vandspejlsstigning, jf. afsnit 6.1.

En anden årsag kan være, at vandløbet er kraftigt overuddybnet på strækningen nedstrøms de aktuelle aflejringer. Her kan det resulterende vandspejl for opmålingen betyde at vandspejlsstigningen ikke bliver 10 cm fordi det reelle beregnede vandspejl som følge af den nedstrøms overuddybning ligger i et lavere niveau.

Dette er godt for vandmiljøet, idet oprensninger begrænses til kun at udføres på strækninger hvor den regulativmæssige vandføringsevne ikke er til stede. Der skal derfor kun foretages oprensning, når det beregnede vandspejlsforløb giver en tilstrækkelig stor vandspejlsstigning på en delstrækning.

Det er nok ikke realistisk, at vandspejlsberegninger fremover kan udføres af alle lods ejere, men en ting der kunne højne troværdigheden omkring beregnerne kunne være at alle inputdata beskrives så detaljeret at resultaterne vil være reproducerbare.

Der anbefales derfor, at der som minimum bør fremgå følgende oplysninger om beregningernes forudsætninger i regulativet:

- Dimensionsskema for den teoretiske skikkelse
- Broer og andre bygværker medtages i beregningerne
- Oplandsstørrelser ved start og slut samt før og efter større tilløb
- Specifikation af de anvendte afstrømningsværdier
- Specifikation af det eller de anvendte Manningtal
- Startvandspejl²⁴
- Der anvendes modstandsradius²⁵

Er vandstanden ved udløbet (startvandspejlet) meget lav, vil det være vandløbets skikkelse, der afgør, hvor højt vandspejlet vil stå ved en given vandføring. Er vandstanden ved udløbet meget høj – vil det på den nedre del af vandløbet være vandspejlsniveauet ved udløbet der er afgørende for det faktiske vandspejl.

I de tilfælde hvor vandstanden ved udløbet varierer meget – vil det give mest mening at sætte startvandspejlet i beregningerne lavt, da et højt startvandspejl vil skjule effekten af eventuelle aflejringer i den nedre stuvningspåvirkede dele af vandløbet.

At alle parametre er defineret og velbeskrevet fra start, vil være med til at sikre, at efterfølgende beregninger foretages på et ensartet grundlag og sikrer samtidig, at de udføres med de samme forudsætninger som blev lagt til grund ved regulativets udarbejdelse og vedtagelse. På den måde kan de konflikter, der bunder i forskellige opfattelser af, hvad der skal regnes på, undgås.

5.3.5 "Der bør regnes på forskellige Manningtal i faktiske og teoretiske skikkelse"

Dette udsagn dækker over hovedkritikken af teoretisk skikkelse og ikke mindst over den måde, hvorpå princippet anvendes og forvaltes i regulativmæssig sammenhæng.

²⁴ Vandspejlsberegninger foregår trinvis i opstrøms retning, og beregningerne tager udgangspunkt i et bestemt startvandspejl.

²⁵ Eller hydraulisk radius, hvis denne parameter anvendes.

I begrundelsen for kritikken anføres det, at et trapezformet geometrisk profil ikke har samme store ruhed som et "naturligt" profil, hvorfor det ikke er retvisende at benytte samme Manningtal ved beregningerne på det opmålte profil som ved beregningerne på det geometriske profil – der bør anvendes et større Manningtal i det geometriske profil end i det opmålte profil.

I argumentationen for, at der skal anvendes forskellige Manningtal i de sammenlignende beregninger, henvises der ofte til Aslyngs lærebøger og beregningsprincipper. Man kan således i H. C. Aslyngs "*Afvanding i jordbruget*" (Den kgl. Veterinære- og Landbohøjskole fra 1970) om Manningtallet læse, at Manningtallet i det grødefrie vandløb vil være 35. Det anføres endvidere, at der ved dimensionering (af regulerede vandløb) almindeligvis anvendes et Manningtal på 35.

Spørgsmålet er derfor, om det er korrekt at lægge Aslyngs anbefalinger til grund for beregningerne i det geometriske profil.

Besvarelsen af dette tilsyneladende enkle spørgsmål er imidlertid langt fra enkel.

Mange små og mellemstore danske vandløb har ikke et Manningtal på 35 om vinteren – det ligger typisk lavere.

Idet der tages udgangspunkt i det ved projekteringen anvendte Manningtal, som ofte har været på 35 (jf. kapitel 4), sammenholdt med det faktum, at de faktiske Manningtal om vinteren ofte er lavere, gøres det gældende, at beregningerne ved brug af teoretisk skikkelse skal udføres med to forskellige Manningtal. Ved beregningerne for den teoretiske skikkelse skal der benyttes Manningtal 30 eller 35, mens der ved beregningerne for opmålingen (faktiske tilstand) skal benyttes et lavere Manningtal, idet det formodes at det faktiske Manningtal i vandløbet med varieret form og forløb er lavere end 35.

Det gøres endvidere gældende, at et meget varieret vandløb, som har mulighed for at udvikle sig formmæssigt ved regulativtypen teoretisk skikkelse, vil - fordi vandløbet er meget varieret - være udsat for større enkelttab, som der ikke tages højde for i vandspejlsberegningerne. Dette punkt behandles særskilt i det næste afsnit.

Ser man nærmere på forudsætningen for brugen af et Manningtal på 30 eller 35, skal man huske, at der på tidspunktet for de omfattende reguleringer af vandløb, ikke var udviklet endsige ibrugtaget begrebet modstandsradius.

I dag er den mest benyttede metode i vandspejlsberegninger i Danmark netop at anvende Mannings formel med modstandsradius²⁶, mens det på tidspunktet for reguleringerne var Ganguillet og Kutters formel og hydraulisk radius, der blev anvendt.

Når man i dag taler om beregnede Manningtal i vandløb, er disse Manningtal bestemt ud fra anvendelsen af modstandsradius.

²⁶ I den øvrige Verden anvendes næsten altid hydraulisk radius i beregninger ved brug af Mannings formel.

Som det fremgår af kapitel 4, skal man benytte forskellige størrelser af Manningtal alt efter, om man i beregningerne benytter modstandsradius eller hydraulisk radius.

I figur 4.4 fremgår det således, at et Manningtal på 30 i et vandløb med en bundbredde på 1 meter og brug af Ganguillet og Kutters formel med hydraulisk radius svarer til et Manningtal på mellem 21 og 26 ved brug Mannings formel og modstandsradius.

En væsentlig del af forskellen mellem de anvendte Manningtal og de Manningtal, som med henvisning til formruheden ønskes benyttet i den teoretiske skikkelse, kan der altså gøres rede for ved, at man ved projekteringen har anvendt hydraulisk radius, mens man i dag ved kontrollen anvender modstandsradius.

Argumentet om brug af forskellige Manningtal kan dog stadig fremføres – men nu blot med en noget mindre difference.

Når Aslyng skrev, at der i det projekterede vandløb ville være et Manningtal på 30/35, var det med en forudsætning om, at der ikke var hverken kantvegetation eller grøde i profilet i vinterperioden. Med hensyn til kantvegetationen var denne forudsætning måske i nogen grad opfyldt ved projekteringen, da det tidligere var almindelig praksis at slå brinkerne "sorte" ligesom alt bundgrøde blev fjernet for at klargøre vandløbet til de store vinterafstrømninger.

Brinkerne bliver ikke længere "slået sort" og grøden skæres ofte i en strømmende.

Det forklarer, at der i dag kan være et lavere vinter-Manningtal end tidligere som følge af kantvegetation og overvintrende grøde men det forhold er ikke specifikt knyttet til teoretisk skikkelse. Den påvirkning af vandføringsevnen, som kantvegetationen har ved store afstrømninger, vil altså være der, uanset om regulativtypen er geometrisk eller teoretisk.

Det skal slås fast, at formålet med de beregninger, der udføres i regulativer med teoretisk skikkelse, er at sikre den vandføringsevne, der svarer til vandføringsevnen i den fastsatte teoretiske skikkelse. Det svarer til, at der i et vandløb med geometrisk skikkelse kontrolleres om skikkelsen er til stede, hverken mere eller mindre²⁷.

Ønsker man at ændre på den faktiske vintervandføringsevne, kan dette gøres ved at indføre en anden og mere hårdhændet praksis i forhold til grødeskæring og kantslåning. Alternativet, at grave vandløbsprofilerne større, kræver gennemførelse af reguleringssager.

5.3.6 "Vandspejlsberegninger tager ikke højde for enkelttab i et varieret profil"

Det har været anført, at et meget varieret vandløb vil have større enkelttab end et trapezformet profil, og at disse enkelttab ikke indgår i kontrolberegningerne. Det er korrekt,

²⁷ Jf. den mulige betydning af formruheden.

at enkelttab ikke indgår i beregningerne, men som det er vist i kapitel 4 er enkelttabet i åbne vandløb så små at de kan negligeres.

Betydelige enkelttab opstår typisk, når bratte indsnævringer ved f.eks. bygværker påvirker det strømmende vand og skaber turbulens. Tilsvarende gør sig gældende i forbindelse med eksempelvis nedskredne brinker, udvækst af tuer i profilet samt sten på bunden.

Ved feltforsøget i Kimmerslev Møllebæk blev der ved indsnævringerne skabt en unaturlig stor og brat profilændring. Det enkelttab, som den bratte profilændring medfører, er ikke indeholdt i beregningerne.

Ser man på forsøgene med indsnævringer og bundhævninger, viser sammenligninger af beregninger og observerede vandstande, at der er god overensstemmelse når effekten af et tiltag skal vurderes i forhold til opstrøms påvirkning. I forhold til forskellen på beregninger og observationer er der dog en forskel omkring selve indsnævringen og/eller bundhævningen som sandsynligvis skyldes enkelttab. Disse forsøg havde meget ekstreme indsnævringer. Var en profilindsnævring knapt så omfattende som de i forsøget fremprovokerede, ville enkelttabet være mindre og forskellene på observationer og beregninger dermed også mindre.

En måde at imødegå eventuelle problemer med enkelttab ved profilindsnævringer kan være, at det sikres at der i regulativet er skrevet, at brinkudskridning kan fjernes. Dette står der allerede i en lang række regulativer. På den måde vil begrænsningerne ved beregningerne blive elimineret i forhold til brinkudskridninger.

Mange regulativer har tilsvarende formuleringer på bundhævninger, hvor der eksempelvis står at beregninger kan undlades hvis der forefindes aflejringer på 10 cm eller mere i vandløbsprofilet.

Ved forsøget med udlægning af sten i Kimmerslev Møllebæk skal det bemærkes, at den observerede vandspejlsstigning umiddelbart opstrøms forsøgsstrækningen var meget begrænset (1,1 og 1,6 cm) og at det allerede 25 meter længere opstrøms stort set ikke kunne registreres, jf. kapitel 6.2.1. Disse sten var et forsøg på at skabe et fysisk mere varieret profil, og effekten var relativt lille; jf. dog kapitel for betydningen af bundhævningsens størrelse på længden af den påvirkede strækning.

5.3.7 Sammenfatning af fordele og ulemper ved regulativtypen teoretisk skikkelse

Regulativer, der er baseret på teoretisk skikkelse, er den mest udbredte type af de to vandføringsevnerregulativer.

Regulativtypen opfylder i udstrakt grad målsætningen om at tilgodese en fri og naturlig formudvikling i vandløbene, samtidig med at den indeholder bestemmelser, der fastholder vandføringsevnen.

Den kvantitative betydning af formruheden for vandføringsevnen er uafklaret, hvorfor det også er uafklaret, i hvilket omfang regulativtypen teoretisk skikkelse fastholder vandføringssevnen, jf. side 19.

Kontrollen af vandføringsevnen foretages på den måde, der er beskrevet i forudsætningerne for benyttelsen af teoretisk skikkelse:

- Der anvendes ved kontrolberegningerne samme Manningtal i det opmålte og i det teoretiske profil²⁸
- Der anvendes ved kontrolberegningerne et Manningtal, der ligger inden for det interval, der korresponderer med vandløbet i grødefri vintertilstand
- Kontrolberegningerne gennemføres ved brug af modstandsradius
- Kontrolberegningerne gennemføres ved brug af to karakteristiske vintervandføringer, vintermiddel og vintermedianmaksimum²⁹.

Kontrollen af vandføringsevnen kan nemt foretages ved forskellige afstrømningsværdier og dette er med til at sikre, at vandløbets vandføringsevne kan kontrolleres ved både høje og middel vinterafstrømninger. Kontrollen ved den lave vinterafstrømning er samtidig med til at sikre drændybden, idet vandløbet for at opfylde kravet ved den lave afstrømningsværdi skal være dybt nok i forhold til den teoretiske skikkelse.

Vandløbet kan kontrolleres på et hvilket som helst tidspunkt af året, idet kontrolopmålingen af vandløbets fysiske tilstand kan foregå med grøde i vandløbet.

Regulativtypen sikrer, at der kun renses op, når aflejringer mv. har betydende indflydelse i forhold til det regulativmæssige vandspejl. Oprensninger, der ikke har nogen effekt på den regulativmæssige vandføringsevne undgås, hvilket er med til at understøtte opfyldelse af de miljømæssige målsætninger.

Der er således flere årsager til, at regulativtypen har fundet stor anvendelse.

Kritikken af regulativtypen og ikke mindst af måden, hvorpå princippet anvendes i praksis, viser, at der er behov for en tydeliggørelse i regulativerne af de beregningsmæssige forudsætninger for kontrolberegningerne³⁰.

Til sammenligning kan nævnes, at kontrollen af vandløb med krav om en bestemt geometrisk skikkelse ikke indebærer beregninger af vandføringsevnen, men alene baseres på opmålinger og sammenligninger med regulativbestemte dimensioner.

²⁸ Det er den praksis, som anvendes i dag, men som følgegruppen med den uafklarede betydning af formruheden sætter spørgsmålstegn ved.

²⁹ Følgegruppen er af den opfattelse, at der til sikring af drænenes udløb er behov for at udvide kontrolberegningerne med en lille vandføring, alternativt at drænenes udløb sikres på anden vis.

³⁰ Følgegruppen anfører i den forbindelse nødvendigheden af at få afklaret betydningen af formruheden for vandføringsevnen.

6. VIRKEMIDLER I VANDLØB OG FREMTIDIG/ÆNDRET VEDLIGEHOLDELSE

Til brug for opfyldelse af både vandplanernes og vandområdeplanernes målsætninger for vandløb er der beskrevet og til dels ibrugtaget en række forskellige virkemidler, fortrinsvis til forbedring af den fysiske vandløbskvalitet. Disse virkemidler er beskrevet i et virkemiddelkatalog, og i forbindelse med forberedelsen af vandområdeplanerne for perioden 2016-2021 har Vandrådene bidraget med forslag til valg af virkemidler i de enkelte indsatsvandløb.

Stort set alle virkemidlerne har til formål at forbedre vandløbenes fysiske tilstand, idet forringet fysisk tilstand i vid udstrækning anses for kritisk i forhold til målopfyldelse for de biologiske kvalitetselementer – smådyr, fisk og planter.

Det har hidtil været praksis, at benyttelsen af virkemidlerne sker efter en forudgående teknisk og biologisk forundersøgelse, og det er forventningen, at samme fremgangsmåde vil blive anvendt i kommende vandplanperiode(r).

Som led i de tekniske forundersøgelser og projekteringen af de specifikke indsatser er der typisk foretaget en række hydrauliske beregninger. Der kan enten være tale om at beregne og dimensionere indsatserne inden for givne vandstandsmæssige rammer, eller der kan være tale om at beregne de vandstandsmæssige konsekvenser af bestemte indsatser og udformninger af disse.

Uanset om beregningerne drejer sig om at dimensionere en indsats, så de vandstandsmæssige konsekvenser holder sig inden for bestemte rammer, eller om det drejer sig om blot at belyse de vandstandsmæssige konsekvenser af en indsats, så sker det altid med et ønske om, at beregningerne skal give retvisende resultater.

Til belysning af, hvor godt beregnede vandstande forud for udførelsen af en indsats stemmer overens med de faktiske vandstande efter udførelsen af en indsats, er der dels gennemført en række beregninger af konsekvenserne af forskellige fysiske forandringer i vandløb af forskellig størrelse og med forskellig bundhældning, og dels gennemført en række feltforsøg til belysning af, hvad der faktisk sker, når indsatserne realiseres. Det drejer sig dels om indsnævring af forskellig længde og dels om forskellige grader af bundhævninger samt forskellige udlægninger af store sten i et profil med kendte dimensioner.

6.1. Beregningseksempler

Til illustration af, hvordan de vandspejlsmæssige konsekvenser afhænger af vandløbets størrelse og bundhældning, er der gennemført en række beregninger for vandløb i vandplanernes tre størrelseskategorier - små (0-2 m) mellemstore (2-10 m) og store (>10 m). Som repræsentanter for de tre kategorier er valgt vandløb med en bundbredde på 1, 4 og 10 meter. For hver af disse tre størrelseskategorier er der regnet på tre forskellige bundhældninger – ringe (0,1 ‰), moderat (1 ‰) og stor (4 ‰).

For hver af disse i alt 9 kombinationer af størrelse og bundhældning er der regnet på indsnævring af forskellig længde og bundhævninger af forskellig højde, og der er for

hvert af disse scenarier regnet ved både lille og stor vandføring. Disse mange scenarier illustrerer, hvordan givne fysiske forandringer kan forventes at påvirke vandstandsforholdene i vandløb med forskellige fysiske karakteristika.

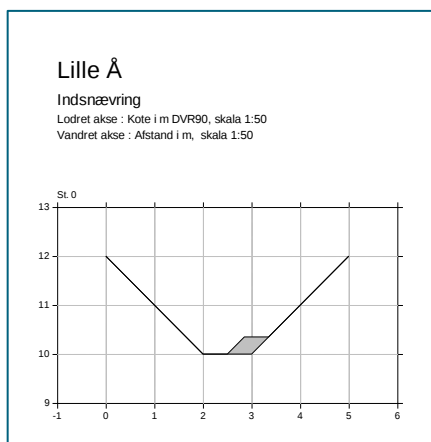
I tillæg til disse beregninger er der også foretaget beregninger af, hvordan bestemte ændringer af Manningtallet påvirker vandstanden i vandløb af forskellig størrelse og med forskellig bundhældning. Manningtalsændringerne kan være resultat af både grødens vækst og grødeskæring, og beregningerne giver derfor et billede af, hvordan grøden henholdsvis grødeskæringen kan forventes at påvirke vandstanden i vandløb med forskellige fysiske karakteristika. Disse beregninger kan på den måde være med til at belyse årsagerne til de forskelle, der er registreret i forskellige vandløb med hensyn til virkningen af grødeskæring på vandstanden.

6.1.1 Betydningen af vandløbets størrelse og bundhældning

I alle 9 typevandløb er der regnet på et trapezformet profil med anlæg 1. Der er ved beregningerne benyttet Mannings formel og modstandsradius. Ved beregning af konsekvenserne ved indsnævring og bundhævning er der benyttet et Manningtal på 22.

6.1.1.1. Indsnævringer

For hver af de 9 typevandløb er der foretaget beregninger på scenarier, hvor profilet er indsnævret til halv bredde over en strækning på 10, 50 og 100 meter. Indsnævringen har i alle regneeksemplerne en højde på 35 cm, jf. figur 6.1.



Figur 6.1. Principskitse af profilindsnævring.

Beregningerne viser, at indsnævringens længde har samme generelle betydning for den beregnede vandspejlsstigning i alle 9 typevandløb: er indsnævringen kort, er den opstrøms vandspejlsstigning mindre end ved en lang indsnævring.

Resultatet af beregningerne svarer til de iagttagelser, der blev gjort ved feltforsøget i Kimmerslev Møllebæk

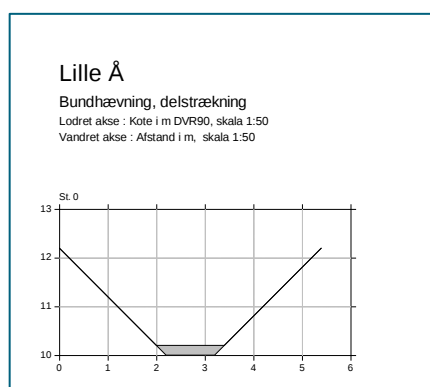
Beregningerne viser desuden, at en indsnævring på en delstrækning påvirker vandstanden længere opstrøms, hvis vandløbshældningen er lille, end hvis den er stor.

Sammenlignes vandspejlsstigningerne ved en lille vandføring (dybde 30-35 cm) med stigningerne ved en stor vandføring (dybde ca. 1 meter), viser beregningerne, at påvirkningen af vandstanden er mindst ved de store vandføringer.

Beregningsresultaterne er vist i bilag 1.1.

6.1.1.2. Bundhævninger på delstrækninger

Tilsvarende regneeksemplerne med indsnævring af vandløbet er der foretaget beregninger på de 9 typevandløb af konsekvenserne af en bundhævning på delstrækninger af varierende længde. Bundhævningerne, der har en højde på 20 cm, har en længde på 10, 50 og 100 meter, jf. figur 6.2.



Figur 6.2. Principskitse af bundhævning.

Resultaterne af beregningerne viser den samme tendens som ved indsnævring, nemlig at længden af den strækning, hvor bunden hæves, har en betydning for vandstandsstigningen i opstrøms retning, hvilket stemmer overens med resultaterne af feltforsøget i Kimmerslev Møllebæk.

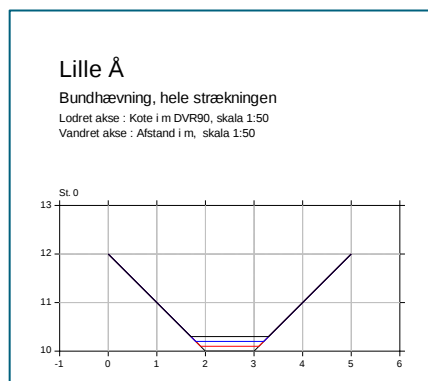
Beregningsresultaterne er vist i bilag 1.2

6.1.1.3. Bundhævninger i hele vandløbet

Ved regulativtypen teoretisk skikkelse beregner man vandspejl for de regulativmæssige dimensioner og for en kontrolopmåling. Hvis vandspejlet beregnet på opmålingen ligger mere end f.eks. 10 cm over vandspejlet beregnet på opmålingsdata, udløser kontrolberegningerne en oprensning. Nogle regulativer indeholder andre kriterier for oprensning.

De beregninger, der er foretaget ved hævnings af bunden i hele et vandløbs længde, tjener til at belyse sammenhængen mellem en bundhævning og den beregnede vandspejlsstigning.

Der er foretaget beregninger med bundhævninger på 10, 20 og 30 cm i de 9 typevandløb, jf. figur 6.3.



Figur 6.3. Principskitse af bundhævninger på 10, 20 og 30 cm over lange strækninger.

En aflejring på bunden af et geometrisk profil, som vist på figuren, resulterer ud over en ændret bundkote også i en ændret bundbredde. Det medfører, at en aflejring på 10 cm medfører en vandspejlsstigning på mindre end 10 cm.

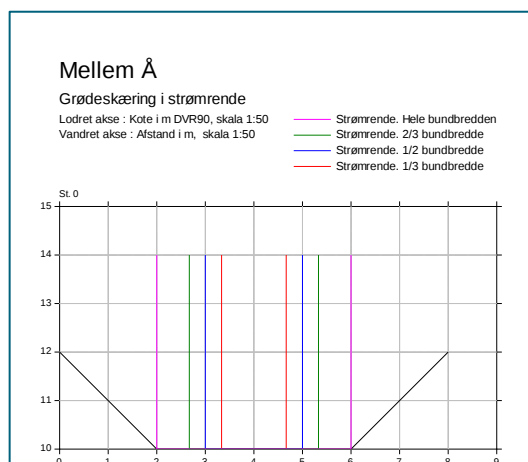
Vandløbets hældning har ingen indflydelse på dette forhold. Beregningerne viser endvidere, at effekten af bundhævning på vandstanden er aftagende med stigende vanddybde. Det betyder, at hvis vandstanden stiger, eks. som følge af stigende vandføring eller på grund af grødevækst, vil der være en aftagende effekt af en given bundhævning.

Beregningsresultaterne er vist i bilag 1.3

Det bemærkes, at den forøgelse af bundbredden, man får ved en bundhævning, er relativt mindre i store i vandløb end i små, hvorfor en bundhævning i store vandløb vil medføre en vandspejlsstigning, der er tættere på størrelsen af bundhævningen.

6.1.1.4. Grødeskæring

Til belysning af effekten af grønnskæringer i forskellige strømrendebredde er der gennemført beregninger i de 9 typevandløb for strømrendebredder på en tredjedel, halvdelen, to tredjedele og hele bundens bredde, jf. figur 6.4.



Figur 6.4. Principskitse af grønnskæring i strømrende med forskellig bredde.

Det er i beregningerne forudsat, at Manningtallet er 8 i hele profilet inden skæringen og at Manningtallet i strømrunden er 18 efter skæringen. Effekten af strømrundeskæring er sammenholdt med effekten af grødeskæring i fuld bundbredde.

Beregningsresultaterne er vist i bilag 1.4

Beregningerne viser, at man ved middelvandføring i et lille vandløb med lille hældning får et vandspejlsfald, der procentvis modsvarer den procentvise strømrundebredde. F.eks. giver en strømrundeskæring i en tredjedel bundbredde et vandspejlsfald på 34% af vandspejlsfaldet ved fuld skæring.

Den procentvise effekt af strømrundeskæringen stiger både med stigende bundbredde og med stigende vandløbsfald. En strømrundeskæring i en tredjedel bundbredde giver i et stort vandløb med stort fald et beregningsmæssigt vandspejlsfald på ca. 50% af vandspejlsfaldet ved fuld skæring.

Disse resultater giver anledning til at revurdere de tommelfingerregler, man tidligere har haft for effekten af grødeskæring, fortrinsvis i mellemstore og store vandløb: skæring i en tredjedel og halvdelen af bundbredden giver ca. 50% henholdsvis ca. 75 % af den maksimalt opnåelige effekt ved skæring i fuld bredde.

En mere udførlig redegørelse om de vandstandsmæssige effekter af grøde og grødeskæring samt modelberegninger af disse er givet i Landbrug & Fødevarer (2011) (<http://docplayer.dk/15648550-Landbrug-foedevarer-konsekvensanalyser-af-aendret-groedeskaering-i-vandloeb.html>), mens Ovesen et al. (2015) (<http://dce2.au.dk/pub/TR49.pdf>) bl.a. indeholder omfattende analyser af Manningtallets variation i forskellige vandløb.

6.1.1.5. Konklusion

Beregningerne af de vandstandsmæssige konsekvenser af de analyserede fysiske indgreb viser følgende generelle forhold:

- Jo længere strækninger med forandringer, desto større vandspejlshævninger i opstrøms retning
- Jo større forandringer, desto større vandspejlshævninger i opstrøms retning
- Jo mindre fald (bundhældning), desto længere påvirkede strækninger i opstrøms retning.

6.2. Feltforsøg i Kimmerslev Møllebæk

Forsøgsstrækningen, feltforsøgene og resultaterne heraf er beskrevet i en særskilt rapport (Feltforsøg i Kimmerslev Møllebæk), der ligger som eksternt bilag til denne redegørelse.

Kimmerslev Møllebæk ligger i Køge Kommune og har på forsøgsstrækningen et fald på 2,2 promille.

I det følgende er forsøgets hovedresultater præsenteret og vurderet med fokus på følgende problemstillinger:

- Målte vandstandsændringer
- Overensstemmelsen mellem beregnede og faktiske vandstandsændringer
- Mulige årsager til afvigelser mellem beregnede og faktiske vandstandsændringer
- Forventningsafstemning med hensyn til nøjagtigheden af beregnede vandstandsændringer.

6.2.1 Udlægning af store sten

Dette forsøg omfattede udlægning af store sten (Ø 30-40cm) på vandløbets bund. Udlægningen skete i to tempi på en ti meter lang strækning, hvor der først blev udlagt 10 og efterfølgende yderligere 12 sten.

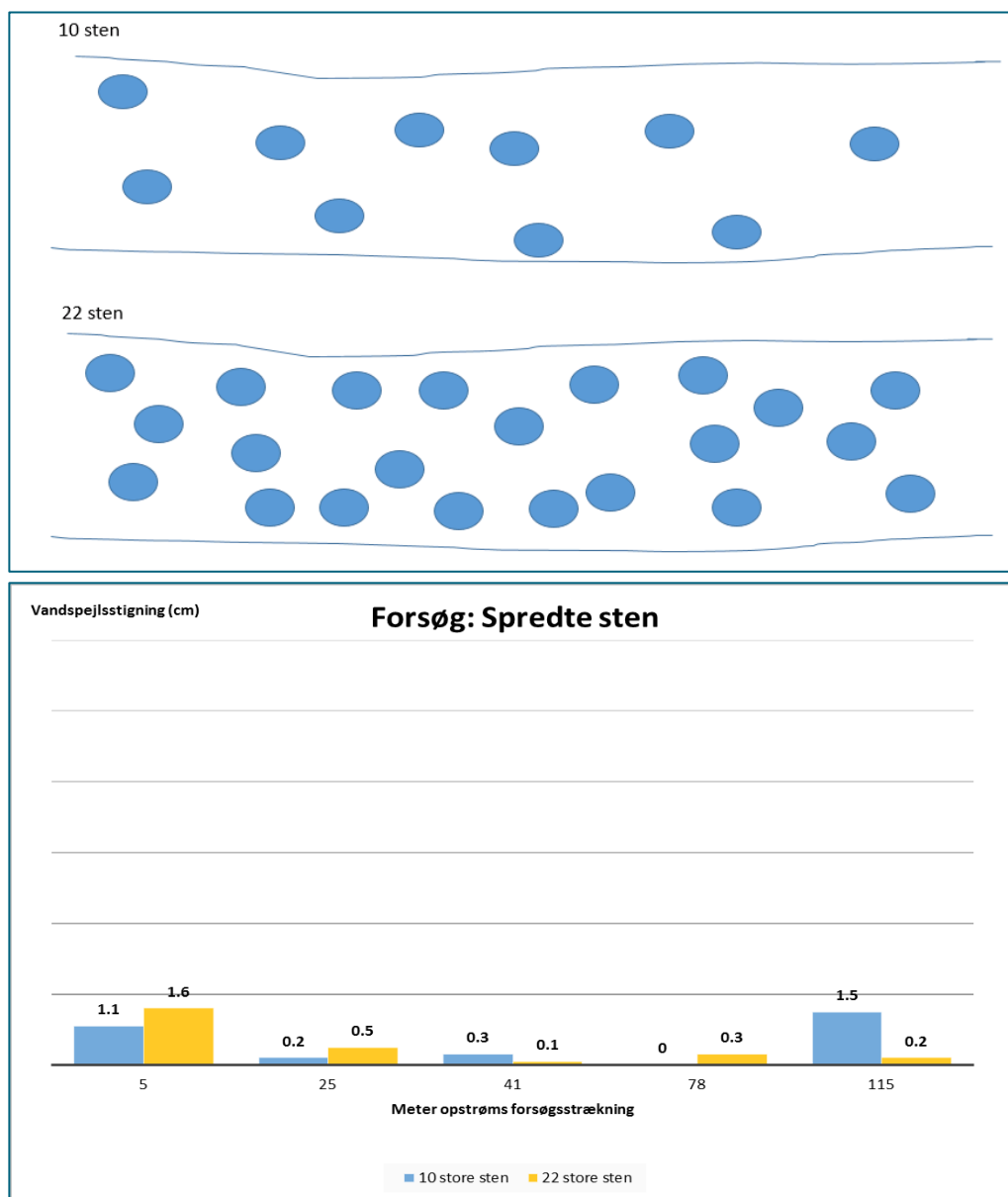
De målte ændringer af vandstanden opstrøms forsøgsstrækningen er vist på figur 6.5.

Forsøget med udlægning af store sten på bunden gav følgende vigtige resultater:

- Udlægning af selv en i forhold til vandløbets størrelse stor mængde af store sten resulterer i en lille øgning af vandstanden på opstrøms strækning
- Jo flere sten, desto større øgning af vandstanden på opstrøms strækning
- Påvirkningen af vandstanden aftager hurtigt i opstrøms retning og antager mere end 25 meter opstrøms forsøgsstrækningen så små værdier, at de ligger inden for rammerne af måleusikkerheden på skalaaflysninger. Dette skal ses i forhold til, at bunden falder 4,4 cm over 20 m (= et fald på 2,2 promille).

Det skal nævnes, at målingerne af de vandstandsmæssige konsekvenser fandt sted i umiddelbar forlængelse af udlægningerne af stenene. Det må forventes, at udlagte sten på længere sigt bevirker en vis erosion af bunden, hvorfor den mere langsigtede virkning af stenene formodes at blive lidt mindre end målt i umiddelbar forlængelse af udlægningen.

Forsøgets resultater er af særlig interesse i forhold til et ofte anvendt restaureringsindgreb i ørredvandløb, hvor der gennem udlægning af sten ønskes skabt bedre og mere varierede fysiske forhold.



Figur 6.5. Målte vandstandsændringer på strækningen opstrøms den strækning, hvor der blev udlagt først 10 og derefter 22 store sten. Bemærk: den store stigning 115 opstrøms forsøgsstrækningen skyldes ikke udlægningen af sten, men tilskrives bl.a. turbulensen på denne station, der er beliggende umiddelbart nedstrøms en bro.

6.2.2 Trinvis indsnævring af profilet

Dette forsøg omfattede en indsnævring af profilet til halv bredde på en trinvis længere strækning – 1, 2, 5 og 10 meter.

De målte vandstandsmæssige konsekvenser er vist på figur 6.6.

Forsøget med indsnævring af profilet gav følgende vigtige resultater:

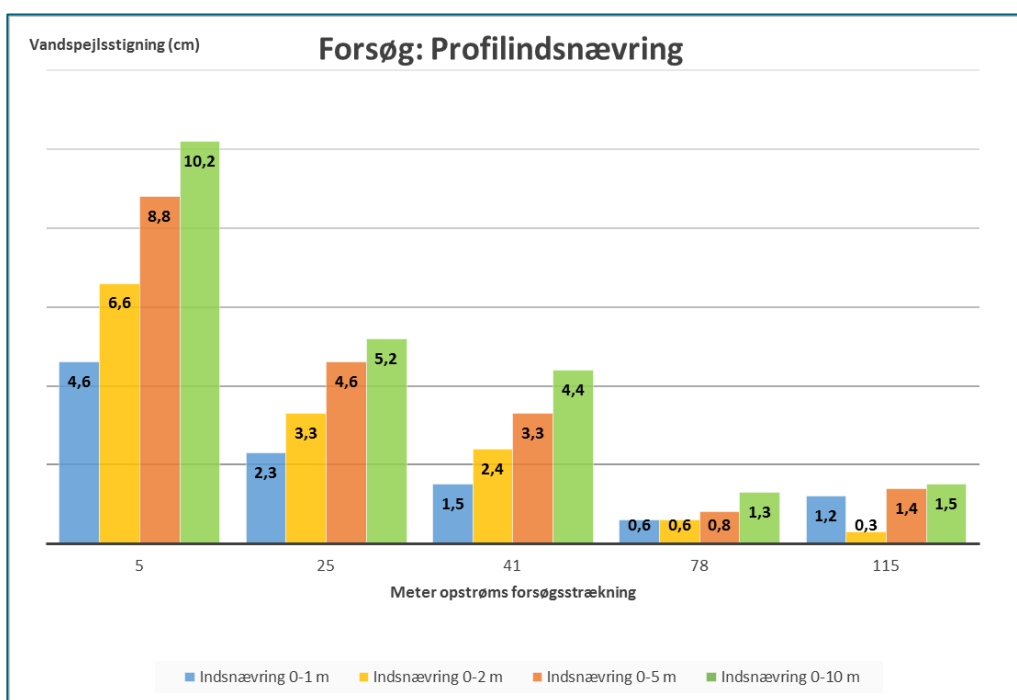
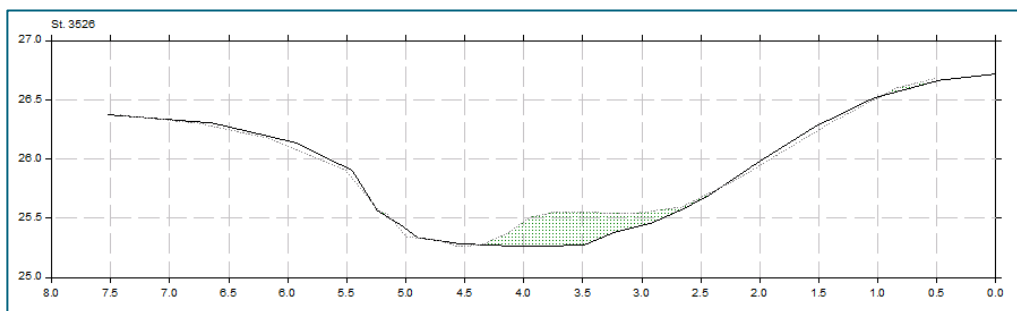
- Indsnævring af profilet bevirker en øgning af vandstanden på opstrøms strækning
- Jo længere strækning med indsnævring, desto større øgning af vandstanden på opstrøms strækning
- Vandstanden er påvirket indtil ca. 80 meter opstrøms forsøgsstrækningen.

Det skal nævnes, at målingerne af de vandstandsmæssige konsekvenser fandt sted i umiddelbar forlængelse af profilindsnævringerne. Det må forventes, at profilindsnævringerne på længere sigt bevirker erosion af bunden qua de øgede vandhastigheder, hvorfor den langsigtede virkning af indsnævringerne formodes at blive mindre end målt i umiddelbar forlængelse af forsøget. Det skal også nævnes, at effekterne af sådanne profilindsnævninger må forventes at være relativt mindre ved vandføringer, der bevirker overskylninger af de indsnævrede dele af profilet.

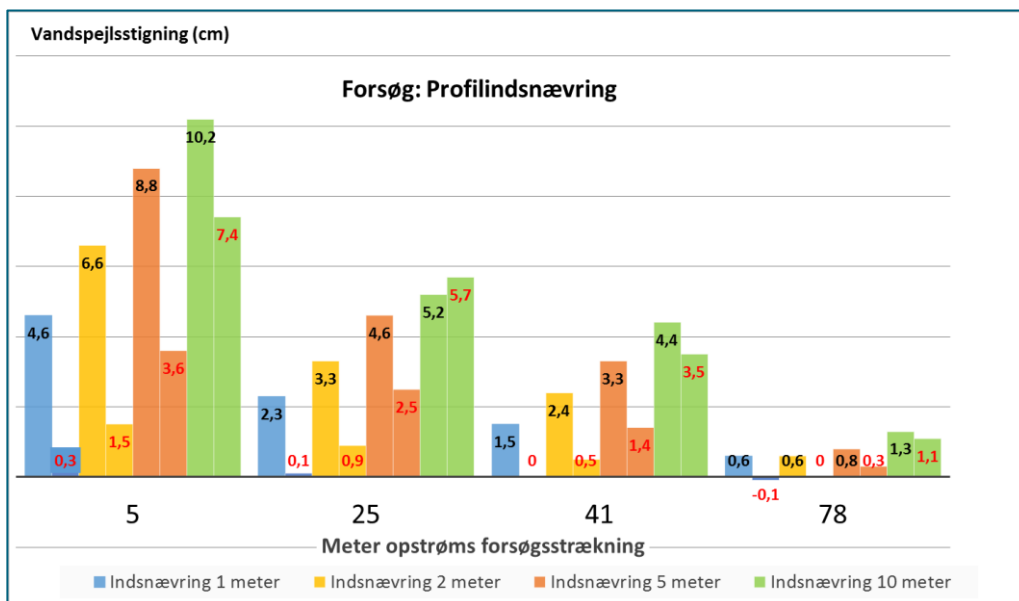
Forsøgets resultater er af særlig interesse og relevans i forhold til de vandstandsmæssige konsekvenser af brinkudskridninger og dannelse af brinkfødde samt i forhold til målrettede restaureringsforanstaltninger.

De vandstandsmæssige konsekvenser af brinkudskridninger og brinkfødde er ofte af interesse i forbindelse med regulativbestemt kontrol af vandføringsevnen, mens konsekvenserne af målrettede profilændringer almindeligvis er af interesse i forbindelse med projektering og konsekvensanalyse af restaureringsindgreb. Det er derfor af interesse at vide, hvordan størrelsen af de målte vandstandsændringer er i forhold til størrelsen af de vandstandsændringer, der kan beregnes på grundlag af et detaljeret kendskab til profilændringerne (opmålingsdata).

Figur 6.7. viser de målte vandstande i forhold til de beregnede vandstande i forsøget med profilindsnævninger.



Figur 6.6. Målte vandstandsændringer på strækningen opstrøms den strækning, hvor der blev foretaget trinvis indsnævring af profilet. Bemærk: den store stigning 115 opstrøms forsøgsstrækningen skyldes ikke profilændringerne, men tilskrives bl.a. turbulensen på denne station, der er beliggende umiddelbart nedstrøms en bro.



Figur 6.7. Sammenligning af målte og beregnede vandstandsændringer i forsøget med trinvis profilindsnævring. Sorte tal angiver de målte værdier og røde tal de beregnede værdier.

Sammenligningen viser, at der er forskelle mellem de målte og de beregnede vandstandsændringer. De mulige årsager til forskellen er diskuteret i kapitel 6.2.4.

6.2.3 Bundhævning over en trinvis længere strækning

Dette forsøg omfattede en ca. 17 cm hævnings af bunden på en trinvis længere strækning – 2, 5 og 10 meter samt etablering af en 2 meter lang og 23 cm tyk tærskel (stryg).

De målte vandstandsmæssige konsekvenser er vist på figur 6.8.

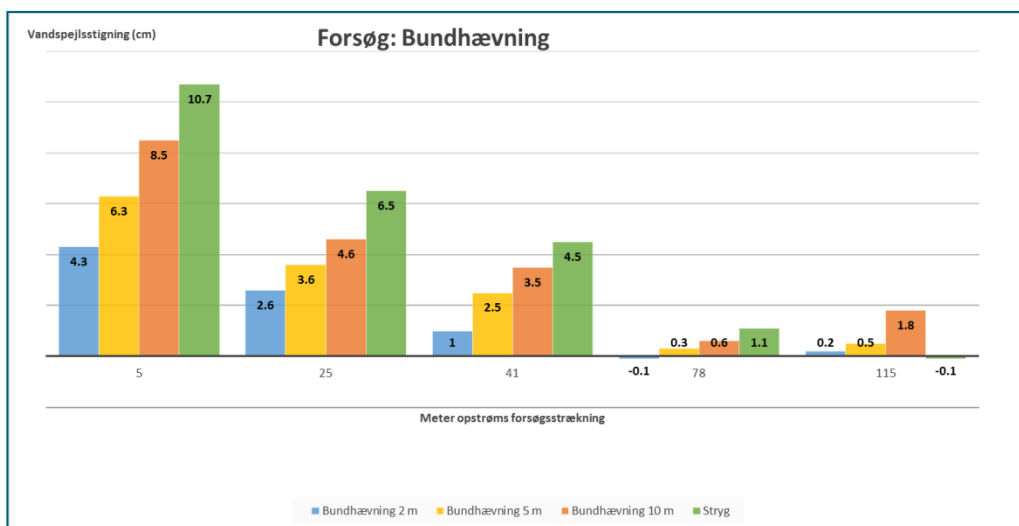
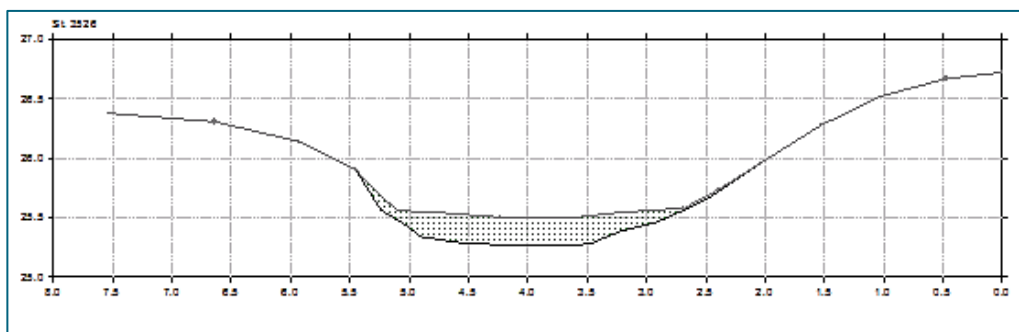
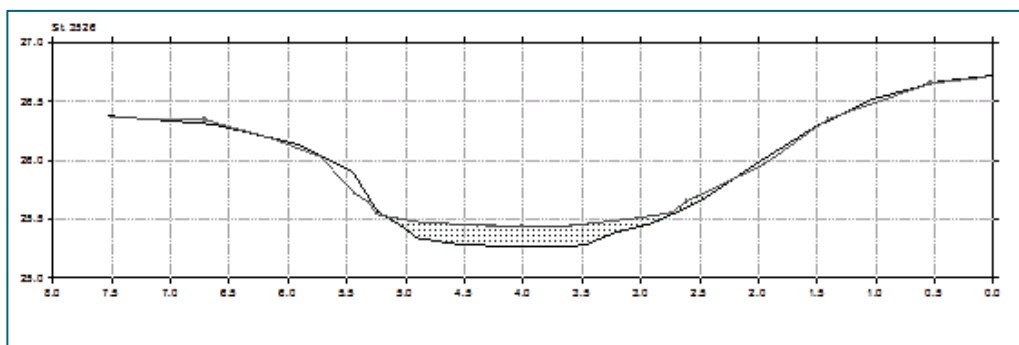
Forsøget med bundhævning på en trinvis længere strækning gav følgende vigtige resultater:

- Hævning af bunden bevirker en øgning af vandstanden
- Jo længere strækning med bundhævning, desto større øgning af vandstanden opstrøms
- Vandstandsændringen er ved alle længder af bundhævningen markant mindre end højden af bundhævningen (tykkelsen af det udlagte bundlag)
- Vandstandsændringen er også ved etablering af et stryg (tærskel) markant mindre end højden (tykkelsen) af bundhævningen.
- Vandstanden er påvirket indtil ca. 80 meter opstrøms forsøgsstrækningen, mest ved etableringen af stryget.

Det skal nævnes, at vandspejlsstigningerne ved bundhævningerne må forventes at være mindre ved store vandføringer.

Forsøget og dets resultater er af særlig interesse og relevans i forhold til de vandstandsmæssige konsekvenser af målrettede restaureringsforanstaltninger, først og fremmest

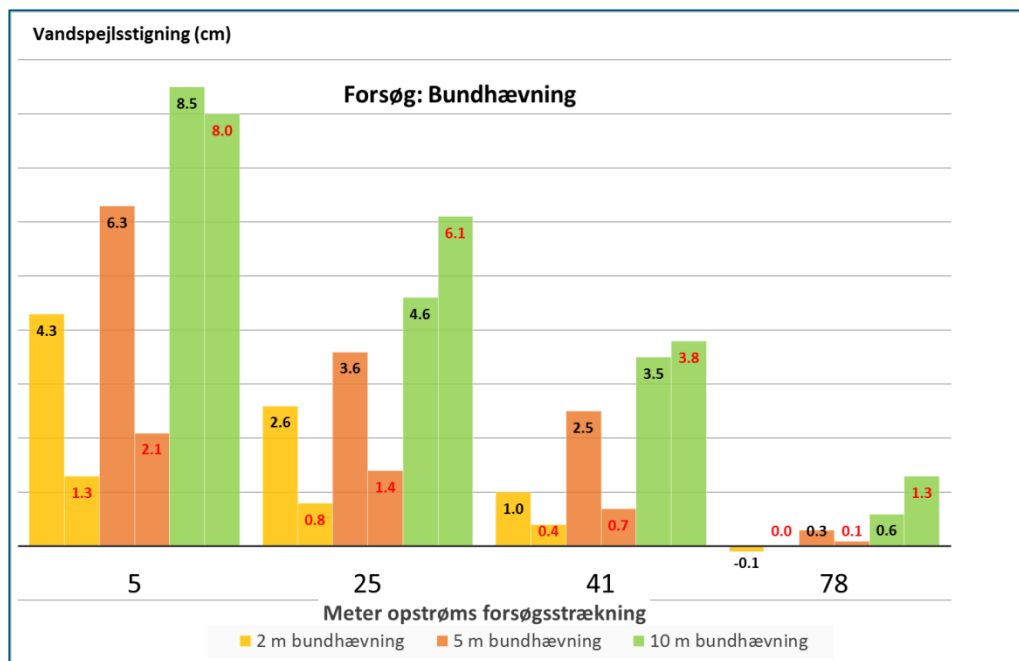
etablering af gydeområder for laksefisk m.fl. og udlægning af groft bundsubstrat. Gydebanker etableres typisk i vandløb med en bundhældning af samme størrelse som bundhældningen i forsøgsvandløbet, og har derudover ofte en længde, som falder inden for forsøgets rammer.



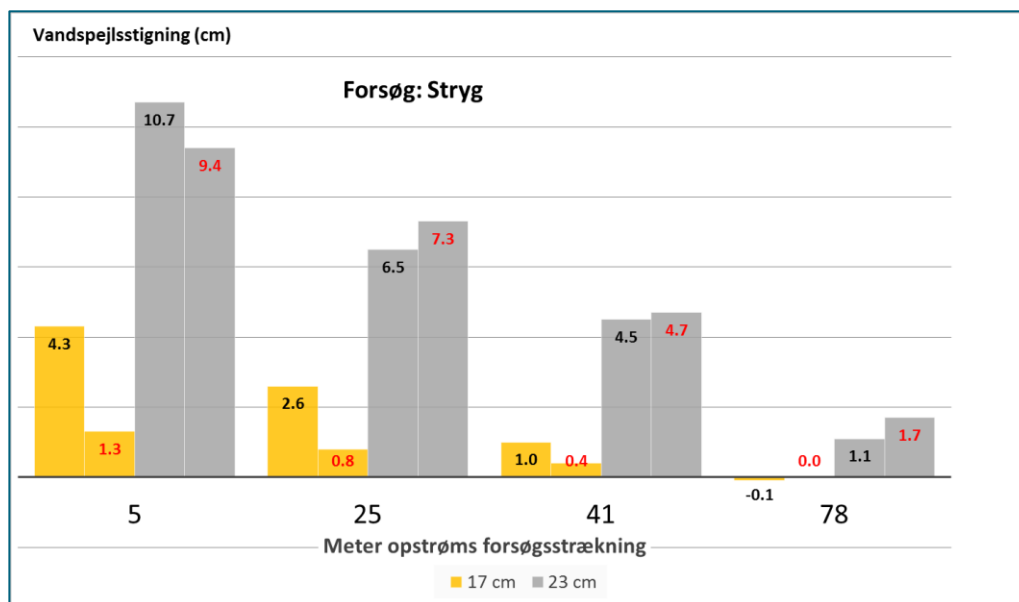
Figur 6.8. Målte vandstandsændringer på strækningen opstrøms den strækning, hvor der blev foretaget hævnin g af bunden på en trinvis længere strækning og etablering af et 2 meter langt stryg. Bemærk: den store stigning 115 opstrøms forsøgsstrækningen skyldes ikke bundhævningen, men tilskrives bl.a. turbulensen på denne station, der er beliggende umiddelbart nedstrøms en bro.

Figur 6.9. viser de målte vandstande i forhold til de beregnede vandstande i forsøget med en 17 cm bundhævning over trinvis længere strækninger, mens figur 6.10. viser

de målte vandstande i forhold til de beregnede vandstande ved en 23 cm bundhævning på en 2 meter lang strækning.



Figur 6.9. Sammenligning af målte og beregnede vandstandsændringer i forsøget med en 17 cm bundhævning over en trinvis længere strækning. Sorte tal angiver de målte værdier og røde tal de beregnede værdier.



Figur 6.10. Sammenligning af målte og beregnede vandstandsændringer i forsøget med en 2 meter lang, 17 cm hhv. 23 cm høj bundhævning. Sorte tal angiver de målte værdier og røde tal de beregnede værdier.

Sammenligningerne viser, at der er en relativt stor forskel mellem de målte og de beregnede vandstandsændringer ved en bundhævning på 17 cm over en trinvis længere

strækning, mens forskellen er mindre ved en 2 meter lang bundhævning på 23 cm. De mulige årsager til forskellen er diskuteret i kapitel 6.2.4.

6.2.4 Mulige årsager til afvigelser mellem beregnede og faktiske vandstandsændringer

Alle sammenligningerne mellem forsøgenes målte værdier og de på baggrund af opmålingerne af profilændringerne beregnede værdier viser, at der er forskelle.

Sammenligningerne viser derudover, at jo længere strækningen med profilindsnævring eller bundhævning er, desto mindre er forskellen mellem de målte og de beregnede vandspejl. Sammenligningen viser derudover, at jo højere tærskel (stryg), desto mindre forskel mellem målte og beregnede vandstand.

En granskning af de mulige årsager til forskellene ved vandspejlsberegningerne er, at der ikke regnes på enkelttab på åbne strækninger. Enkelttabet beregnes på grundlag af den forskel på vandhastigheder, der er på forsøgstrækningen i forhold til strækningerne umiddelbart op- og nedstrøms forsøget.

Jo kortere indsnævringen eller bundhævningen er, desto større er forskellen på hastighederne på forsøgsstrækningen i forhold til hastigheden på strækningerne op- og nedstrøms forsøget. Enkelttabet bliver derfor større og dette svarer overens med de observerede forskelle.

Hvis vandstanden er højere, vil forskellen på hastigheder og dermed enkelttabet blive mindre. Vandspejlsberegningerne er derfor mere retvisende ved beregningerne ved høje vandstande.

Hertil kommer, at der både er et indløbs- og et udløbstab af energi. Jo længere strækningen en profilændring er, desto mindre vil udløbstabet kunne registreres i opstrøms retning.

I forsøget med profilindsnævring vil hastighedsforskellene være større end i forsøgene med bundhævninger. Der er derfor et relativt større enkelttab ved profilindsnævringerne end ved bundhævningerne, hvilket bevirker en større forskel på de målte og beregnede vandstande.

En anden medvirkende årsag til, at der er forskel på målte og beregnede vandstande er, at Manningtallet på forsøgsstrækningen ændrer sig, når der udlægges groft materiale i vandløbet. Det bemærkes, at der i beregningerne af forsøgets vandstandsmæssige konsekvenser ikke er ændret på det Manningtal, der forud for forsøgets gennemførelse blev beregnet for forsøgsstrækningen.

6.2.5 Konklusion

Feltforsøgene viser, at det er muligt at beregne de vandstandsmæssige konsekvenser af fysiske forandringer i vandløb med betydelig nøjagtighed (= god overensstemmelse

med de faktiske forhold). Men forsøgene og beregningerne viser også, at der er en vis usikkerhed på beregningerne. Følgegruppen udtaler på den baggrund følgende:

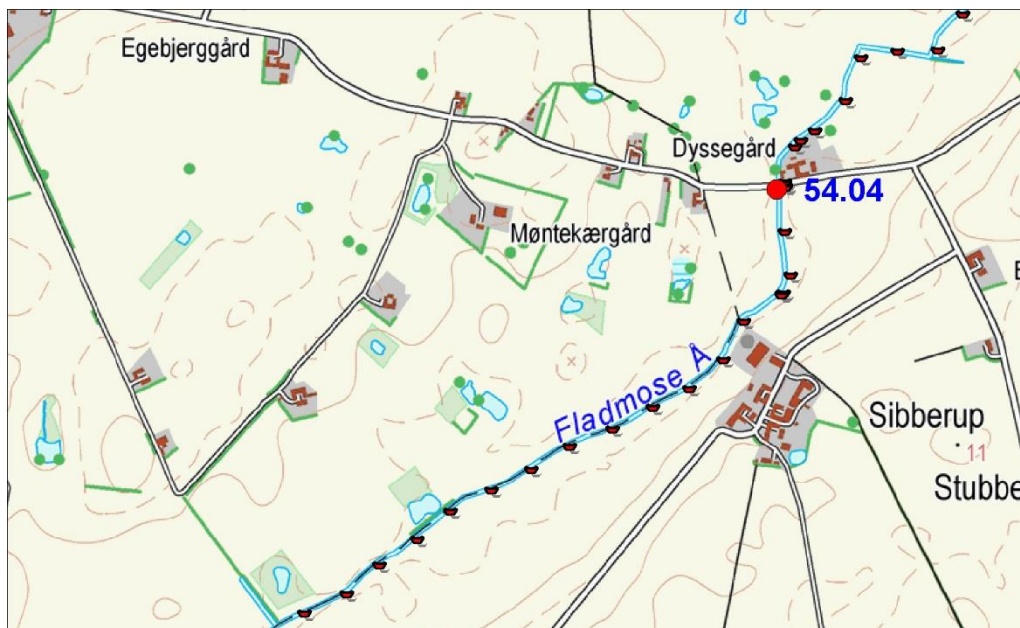
En vis unøjagtighed må anses som værende et vilkår ved vandspejlsberegninger, som man bliver nødt til at leve med, forudsat at beregningerne baseres på gode inputdata. Følgegruppen anser det for vigtigt, at unøjagtigheden på vandspejlsberegninger og dens størrelse så vidt som muligt formidles sammen med fremstillingen af beregnede konsekvenser i projekter, hvori der indgår beregnede vandspejl.

Følgegruppen opfordrer til, at man fremover foretager målrettet overvågning af de vandspejlsmæssige konsekvenser af foranstaltninger og indgreb, der bliver dimensioneret og konsekvensbeskrevet på grundlag af vandspejlsberegninger. En sådan opfølgende overvågning vil på den ene side forbedre vidensgrundlaget og på den anden side muliggøre korrigerende handlinger i tilfælde af betydende afvigelser. Følgegruppen anbefaler, at opfølgning fokuseres på foranstaltninger og indgreb med betydende effekter på vandstanden.

6.3. Grødeskæring i Fladmose Å

I tillæg til feltforsøgene med fysiske profilændringer i Kimmerslev Møllebæk har Slagelse Kommune stillet data til rådighed fra Fladmose Å, som beskriver vandstandsændringen i forbindelse med grønnskæring på den strækning, der er vist på figur 6.11.

I vandløbets station 2289 findes målestation 54.04 Fladmose Å, Dyssegård, der drives af Naturstyrelsen. Stationens oplandsareal er 14 km². Registrerede vandstande og beregnede vandføringer fra denne station er stillet til rådighed for analysen af Naturstyrelsen og anvendt til beregning af de ændringer af Manningtallet, som grønnskæringen medførte. Vandløbet har, på strækningen, en regulativmæssig bundbredde på 1,20 meter og et fald på ca. 0,6 ‰.



Figur 6.11. Oversigt over beliggenheden af den strækning af Fladmose Å, hvor der er foretaget forsøg med en trinvis skæring af grøden.

Grødeskæringen blev af hensyn til forsøget gennemført i to omgange, mod normalt i én omgang. Skæringerne fandt sted den 11. og den 17. september 2015 og foregik med mejekurv.

Ved den første grødeskæring den 11. september blev en delstrækning nedstrøms målestationen skåret i en strømrønde med en bredde på 60 cm, svarende til halvdelen af den regulativmæssige bundbredde, se figur 6.12.

Ved den anden grødeskæring den 17. september blev hele vandløbet slået i regulativmæssig bredde, hvorved strømrøndens bredde på delstrækningen nedstrøms målestationen blev udvidet fra 60 til 120 cm, se figur 6.13.

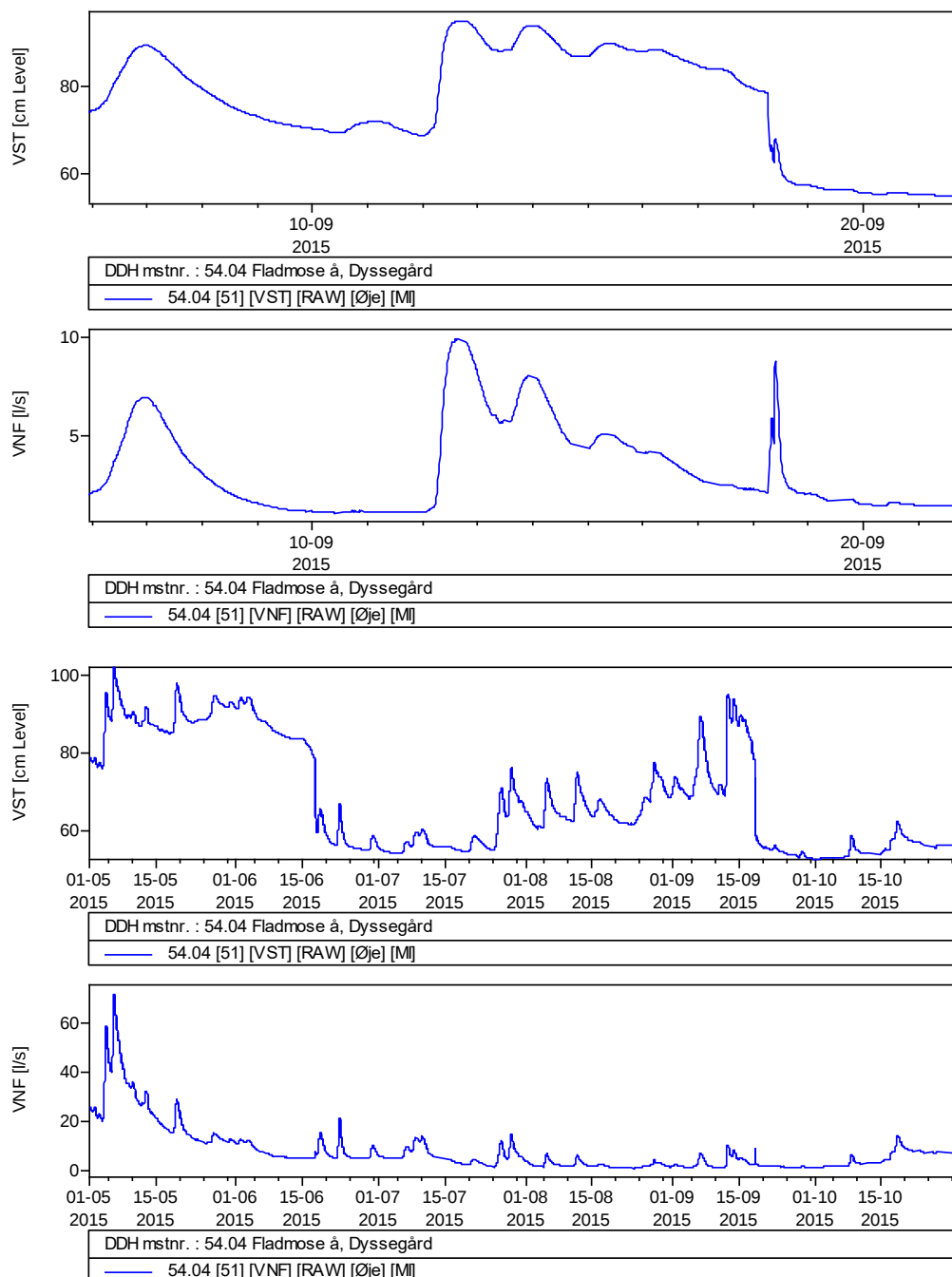
Figur 6.14 viser ændringerne af vandstand og vandføring i og omkring den periode, hvor de to grødeskæringer fandt sted, mens figur 6.15 viser de Manningtal, der ved brug af opmålingsdata kan beregnes på grundlag af de sammenhørende værdier af vandføring og vandstand.



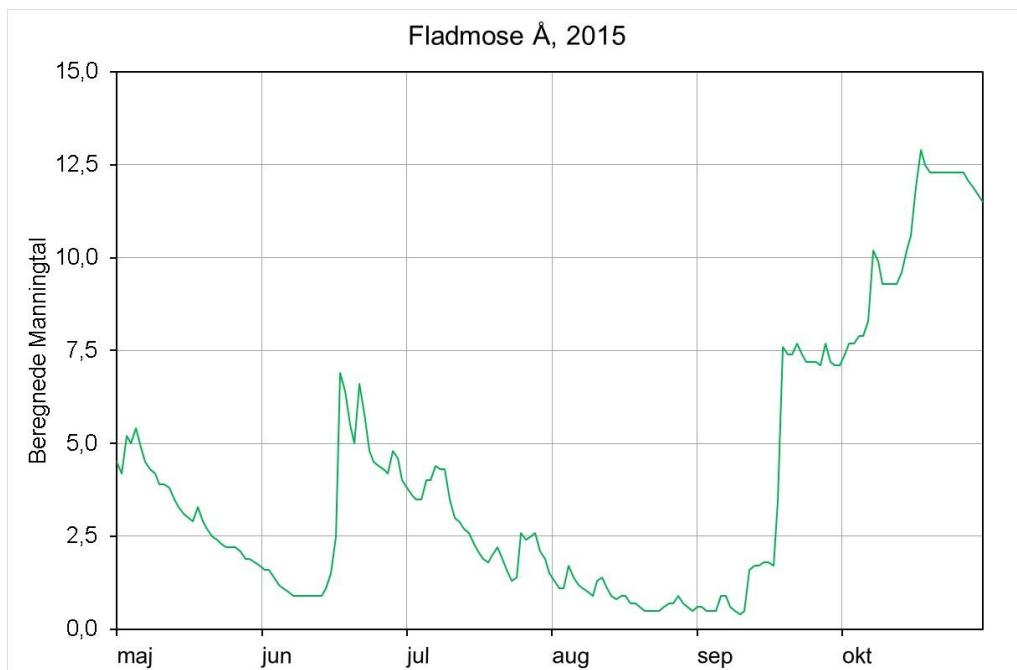
Figur 6.12. Forsøgsstrækningen efter første grødeskæring den 11. september 2015.



Figur 6.13. Forsøgsstrækningen i forbindelse med anden grødeskæring den 17. september 2015.



Figur 6.14. Oversigt over variationen af vandføring og vandstand på forsøgsstrækningen i Fladmose Å i og omkring perioden med grødeskæring.



Figur 6.15. Beregnede daglige Manningtal, gældende for forsøgsstrækningen i Fladmose Å i og omkring perioden med grødeskæring.

6.3.1 Vurdering

Det er efter analyse af de hydrometriske data vurderingen, at forsøget er behæftet med flere alvorlige svagheder.

Det er således en alvorlig svaghed, at vandføringen i perioden før grødeskæringen var meget lille (<2 l/s). En anden svaghed ved forsøget er, at der tilsyneladende blev skåret grøde på en for kort strækning ved første skæring, hvorfor der ikke skete nogen nævneværdig sænkning af vandstanden ved denne skæring.

Forsøget har derfor ikke givet den tilsigtede information om effekten af at skære halvdelen af grøden bort i forhold til at skære al grøden bort i den regulativbestemte bundbredde.

Forsøget viser med stor tydelighed de vanskeligheder, der kan være forbundet med at gennemføre og beskrive grødeskæringsforsøg.

7. KLIMAFORANDRINGER

Det er et velkendt og almindeligt anerkendt faktum, at når vandføringen i et vandløb stiger, så stiger også vandstanden. Det følger også af Manningformlen

$$Q = A \cdot M \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

om end indirekte, idet relationen mellem vandføringen (Q) og vandstanden kommer til udtryk gennem gennemstrømningsarealet (A): jo større vandføring, desto større gennemstrømningsareal, og da gennemstrømningsarealet kun kan øges opadtil i et vandløb med fast bund og faste sider, er øget vandføring alt andet lige forbundet med højere vandstand.

Denne sammenhæng mellem vandføring og vandstand er baggrunden for interessen for, hvordan klimaforandringerne vil påvirke vandstanden i vandløbene, og dermed afvandingstilstanden omkring vandløbene.

7.1. Allerede stedfundne klimaforandringer

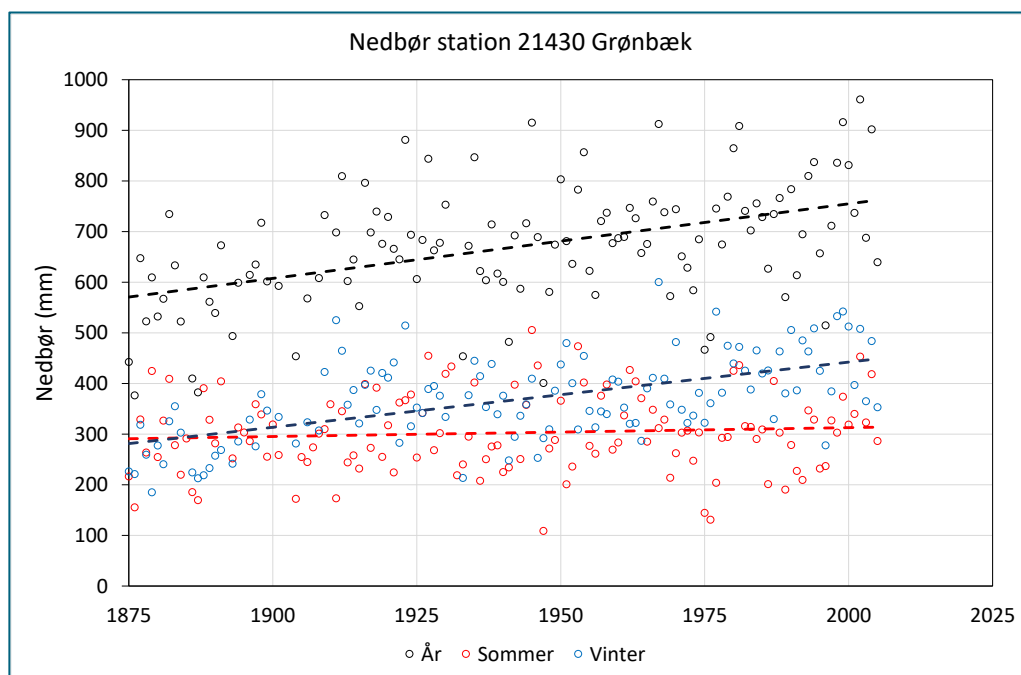
Talen om klimaforandringer drejer sig mestendels om de forventelige fremtidige forandringer, og ikke så meget om de forandringer, der allerede er sket.

Overvågningen af nedbøren og vandføringen i vandløb viser imidlertid, at vi allerede i dag befinder os i nedbørs- og afstrømningsscenarier, der i løbet af de seneste årtier har ført til målbare forandringer, eksemplificeret i figur 7.1 og 7.2.

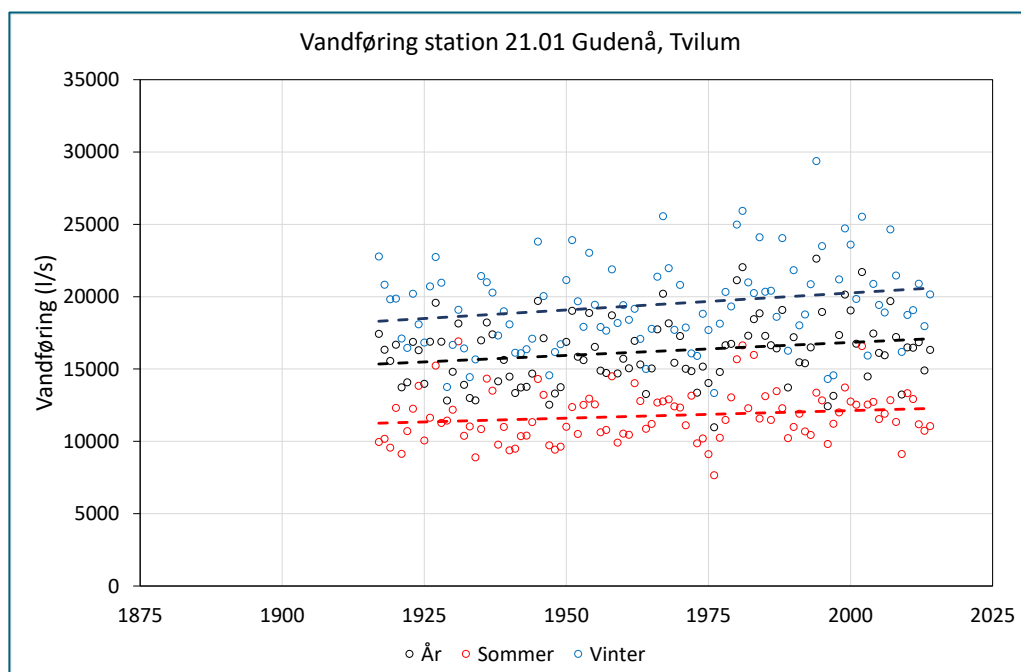
Ser man på nedbøren, viser eksemplet fra Grønbæk, at der siden 1875 er sket en tydelig øgning af både årsnedbøren og af vinternedbøren, mens sommernedbøren udviser en langt mindre tydelig stigningstakt.

Udviklingen af nedbørens størrelse er tydeligt afspejlet i størrelsen af vandføringen i Gudenåen. Sammenhængen mellem nedbørens og vandføringens størrelse er forventelig, idet der er sammenhæng mellem den mængde nedbør, der falder over et vandløbs opland, og den mængde vand, som vandløbet skal føre til havs.

På grund af vandets passage gennem jorden og nedsivningen til grundvandet og derfra videre til vandløbet, følger udviklingen i afstrømningen i vandløbet ikke helt samme mønster som udviklingen i nedbøren. Særligt iøjnefaldende er det, at sommermiddelvandføringen udviser en forholdsvis stor stigningstakt, hvilket hænger sammen med, at en del af vinternedbøren efter passagen gennem jorden og via grundvandet først strømmer til vandløbet i sommerperioden. Denne tidsmæssige forsinkelse af afstrømningen af overskudsnedbøren påvirker også størrelsen af års- og vintermiddelvandføringen.

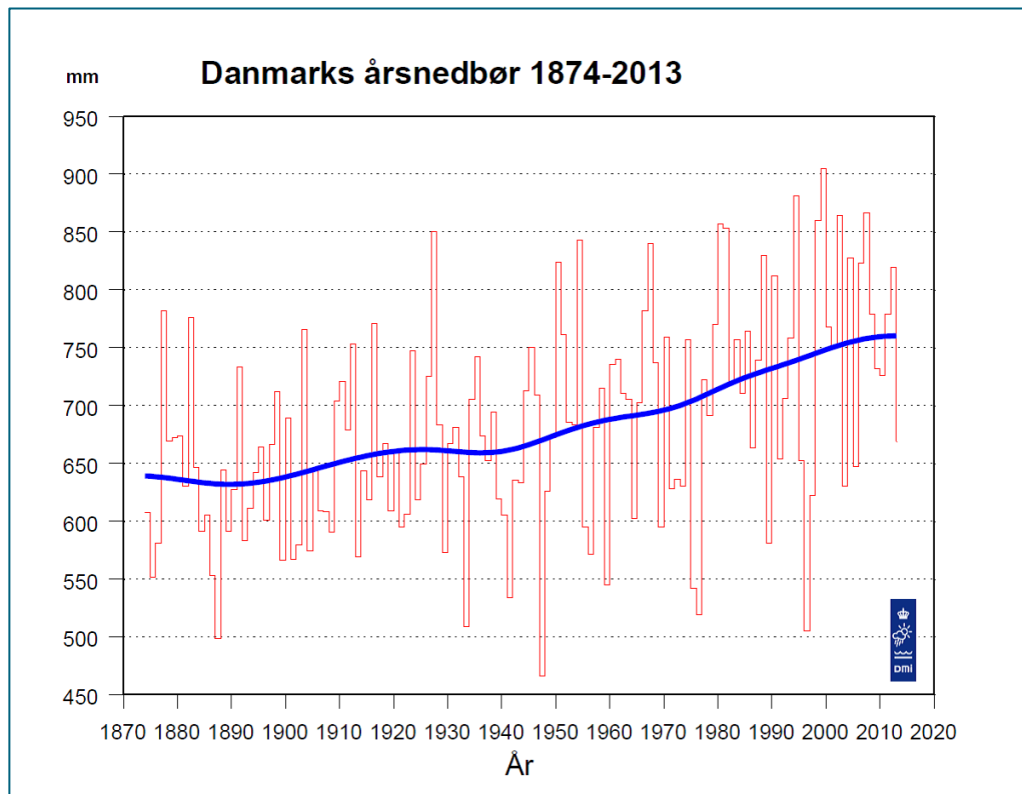


Figur 7.1. Oversigt over udviklingen af nedbørens størrelse på målestation 21430 Grønbæk. Figuren viser udviklingen af dels årsnedbøren, dels vinternedbøren og dels sommernedbøren.



Figur 7.2. Oversigt over udviklingen af vandføringens størrelse i Gudenåen på målestation 21.01 Tvilum. Figuren viser udviklingen af dels årsmiddelvandføringen, dels vintermiddelvandføringen og dels sommermiddelvandføringen.

Det er således et faktum, at mængden af nedbør er øget, se figur 7.3, men det er også et vigtigt faktum, at øgningen af nedbøren er meget forskellig fra egn til egn, se figur 7.4.



Figur 7.3. Oversigt over udviklingen af årsnedbørens gennemsnitlige størrelse i Danmark i perioden 1874-2013.

Man kan derfor ikke tage ændringen af landsgennemsnittet som udtryk for ændringen i de forskellige egne af landet. Og man kan ikke tage ændringerne i én egn som udtryk for ændringerne i andre egne.

Det er samlet set forventeligt, at når der falder mere nedbør, så er der også større mængde vand, der skal afstrømme fra landarealerne via vandløbene. Det er derfor ikke overraskende, at de øgede mængder nedbør er afspejlet i vandføringens størrelse i vandløbene. Men ligesom nedbøren udviser også ændringen af vandføringen i vandløbene stor stedlig variation, og også her gælder derfor, at man ikke kan tage ændringerne i ét vandløb som udtryk for ændringerne i andre vandløb.

7.1. Fremtidige klimaforandringer

I modsætning til vores viden om allerede stedsfundne klimaforandringer, der er baseret på faktiske nedbørs- og vandføringsmålinger, er vores viden om de fremtidige klimaforandringer baseret på modelforudsigelser og dermed behæftet med langt større usikkerhed.

Det første problem ved forudsigelsen af de fremtidige afstrømningsforhold i vandløbene knytter sig til usikkerheden på forudsigelsen af de fremtidige nedbørsforhold. Modelerne forudsiger mængden af nedbør i år 2050 eller 2100, og forudsiger derudover nogle væsentlige ændringer af nedbørsmønstret.



Figur 7.4. Oversigt over den regionale udvikling af årsnedbørens størrelse i Danmark fra perioden 1931-1960 til perioden 1961-1990.

For landet som helhed forventes der i 2050 således 7 % mere nedbør end i dag (<http://www.klimatilpasning.dk/viden-om/klima/klimaaendringeridanmark.aspx>), og det forventes, at nedbøren vil falde mere ujævnt end i dag med bl.a. mere nedbør i vinterhalvåret (11% mere nedbør), længere tørkeperioder om sommeren og samtidig flere og voldsommere skybrud.

Hvordan udviklingen frem mod de forudsagte forhold i år 2050 vil forløbe i detaljer, giver modellerne ikke noget talmæssigt og tidsmæssigt svar på. Men det må forventes, at de fremtidige ændringer vil udvise samme store – eller måske endog større - variation, som de allerede stedfundne ændringer. Vejen frem mod de større nedbørsmængder i år

2050 kan således rumme såvel perioder med mindre nedbør end gennemsnittet som perioder med mere nedbør end gennemsnittet.

Det er vanskeligt at omsætte de forventelige ændringer af nedbørsforholdene til forventelige ændringer af vandføringen i vandløbene, men GEUS har i rapporten "*Klimaeffekter på hydrologi og afstrømning – klimaekstremvandføring*" (2013) gjort et første forsøg på at omsætte nedbørsscenarierne til afstrømningsscenarier for vandløbene. Disse afstrømningsscenarier varierer i lighed med nedbørsscenarierne fra sted til sted, hvilket betyder, at der ikke kan forventes samme fremtidige ændringer af afstrømningsforholdene i alle egne og i alle vandløb.

Det generelle billede for danske vandløb er, at maksimumsvandføringen frem mod år 2050 vil øges med i størrelsesordenen 30 %, at årsmiddelvandføringen vil øges på grund af de generelt større nedbørsmængder, og at sommerminimumsvandføringen vil øges på grund af vinterens større grundvandsdannelse og deraf følgende større grundvandsafstrømning til vandløbene, mens sommermiddelvandføringen vil mindskes på grund af flere og længere perioder med ringe nedbør eller tørke. Flere og voldsommere skybrud vil forventeligt bevirke flere store, men kortvarige afstrømningshændelser i sommerperioden.

Der er endnu ikke foretaget mange beregninger af, hvordan de forventede ændringer af nedbøren og afstrømningen vil påvirke vandstanden i danske vandløb, men Orbicon udarbejdede i 2013 for Norddjurs Kommune en redegørelse om de forventelige ændringer af vandstandsforholdene i 4 konkrete vandløb (Norddjurs Kommune, 2014).

Beregningerne viste – ikke overraskende – at de forudsagte ændringer af afstrømningen generelt vil bevirke højere vandstande i vandløbene. Men fordi man ikke kender – og ikke kan forudsige - de finere detaljer i de fremtidige afstrømningsmønstre, kunne beregningerne ikke beskrive hverken de tidslige eller rumlige forløb af de oversvømmelseshændelser, der er potentielle konsekvenser af de flere og voldsommere skybrud.

Det betyder, at selvom der med gode hydrometriske data er mulighed for i et vist omfang at indarbejde de forventelige ændringer af afstrømningen og afstrømningsmønsteret i beregningsgrundlaget, så vil beregninger af de forventelige vandstandsforhold i og omkring vandløbene i år 2050 i udstrakt grad have karakter af gennemsnitsberegninger.

En anden svaghed ved beregninger af de fremtidige vandstandsforhold som følge af klimaforandringer er, at man ikke kender forløbet af den udvikling, der i år 2050 forventes at have resulteret i ændringer af en bestemt størrelse. Det betyder, at man ikke har modeldata til at foretage beregninger af forholdene i givne år, men er henvist til at gøre antagelser om et simpelt – typisk lineært – udviklingsforløb. Det vil sige, at hvis der i år 2050 forventes en 30 % større afstrømning end i 2013, så vil den gennemsnitlige årlige øgning af afstrømningen være i størrelsesordenen knap 1 %.

Samlet set har vi med rapporten fra GEUS fået et billede af, hvordan klimaforandringerne forventes at øge afstrømningen i vandløbene i år 2050 i de forskellige egne af landet. På det operationelle plan er billedet imidlertid endnu for udetaljeret til at kunne

danne grundlag for eksakte beregninger af, hvordan ændringerne vil påvirke vandsandsforholdene i og omkring vandløbene, tidsligt såvel som rumligt.

Det er derfor oplagt at se på, hvordan vandløbene forventes at reagere på stigende vandføringer og dernæst på muligheder og begrænsninger for at påvirke vandløbenes naturlige størrelsesmæssige tilpasning til øget afstrømning.

7.2. Vandløbs størrelse i forhold til vandføringens størrelse

Vandløb har fra naturens side en størrelse og en vandføringsevne, der grundlæggende er bestemt af afstrømningens størrelse, og af måden, hvorpå afstrømningen finder sted (afstrømningsmønsteret). Denne relation mellem vandføringens og vandløbenes størrelse er tydeligt afspejlet i vores sproglige betegnelse af vandløb med forskellig størrelse: bæk – å – flod i nævnte rækkefølge.

Dette naturgivne forhold mellem afstrømningens og vandløbenes størrelse betyder, at man på de store linjer må forvente, at vandløbene til stadighed søger mod en størrelse, der korresponderer med vandføringens størrelse og variationsmønster. Hvis vandløbene er i ligevægt med afstrømningens størrelse og variation, vil der ikke være nogen størrelsesudvikling, men hvis det forholder sig, som tilfældet er i dag, nemlig at afstrømningen er under forandring, vil vandløbene være under størrelsesmæssig udvikling. Og hvis afstrømningen ændrer sig løbende over lang tid, vil vandløbene ikke nå en ny ligevægt, men til stadighed være under størrelsesmæssig forandring. Disse betragtninger gælder naturligvis under forudsætning af, at vandløbene i udgangspunktet er i ligevægt, hvilket langt fra altid er tilfældet. Det kan derfor ikke udelukkes, at regulerede vandløb, der ikke er i ligevægt, reagerer anderledes på ændret afstrømning end naturlige vandløb.

Det er således velkendt, at når man fjerner en del af et vandløbs vandføring, f.eks. i forbindelse med dambrugsdrift eller vandindtag til vandkraft, så ændres vandløbets størrelse (bundbredde), indtil der igen er balance mellem vandføringens størrelse og variation og vandløbets størrelse. Sådanne størrelsesmæssige tilpasninger sker erfaringsmæssigt hurtigt, fordi bredvegetationen sammen med sedimentaflejringer er med til at indsnævre vandløbene og derigennem tilpasse størrelsen til vandføringens størrelse og variation.

Relationen mellem størrelse og vandføring er ganske vist blevet påvirket gennem den regulering, der har fundet sted i de fleste vandløb, men relationen mellem afstrømningens og vandløbets størrelse gælder dog på overordnet niveau stadig i de fleste vandløb. Reguleringen af vandløbene kan dog have betydning for, hvordan og med hvilken hastighed størrelsestilpasningen finder sted, sammenlignet med vandløb i naturtilstand.

Der er ved flere lejligheder gjort forsøg på at beskrive sammenhængen mellem vandløbenes og vandføringens størrelse, senest af Københavns Universitet, jf. "*Klassifikation af vandløb og ådale*" (Mernild, Sebastian H.; Hasholt, Bent. I: Vand og Jord, Nr. nr. 1, 2003, s. 21-23.).

Essensen af dette arbejde er, at det er de store, og derfor mest energirige vandføringer (bredfuld vandføring), der er bestemmende for vandløbenes naturlige størrelse, og at relationen mellem størrelse og afstrømning er afhængig af den jordtype, vandløbene gennemstrømmer.

Relationen ses ikke så tydeligt i danske vandløb som i visse udenlandske floder, der om sommeren kan have en meget lille vandføring i et meget stort flodleje, hvis dimensioner er bestemt af vintervandføringerne.

Selvom det helt overordnet forholder sig sådan, at et vandløbs størrelse på langt sigt vil tilpasse sig til en øget vandføring, så er det alligevel uvist, hvad der vil ske på kortere sigt, når et vandløbs vandføring øges og vandføringsmønsteret ændres. Hvis vandføringen hvert år øges med en bestemt procentdel, vil vandløbets bredde – og dermed vandføringsevne – da også øges med samme procentdel og i samme takt? Således at vandstanden i forhold til de omgivende arealer forbliver uændret? Og hvordan vil store afstrømningshændelser påvirke formudviklingen?

Der gives ikke nogen enkle svar på disse spørgsmål, men helt overordnet må det forventes, at vandløbenes naturlige tilpasning af størrelsen til øget vandføring sker så langsomt, at der i forløbet frem mod en bestemt øgning af vandføringen og indstillingen af en ny ligevægt mellem størrelse og vandføring vil forekomme forhøjede vandstande. Det kan være et større problem i regulerede vandløb end i naturlige vandløb.

Det hænger sammen med, at danske vandløb er rige på vegetation, på bunden såvel som på brinkerne. Havde vandløbene gennemstrømmet vegetationsløs jord, ville strømmen have haft langt nemmere ved at erodere bund og sider, men når disse flader er bevoksede, sker erosionen meget langsommere og kun i forbindelse med de største, mest energirige vandføringer.

Klimaforandringerne forventes ganske vist at afstedkomme større vintervandføringer i vandløbene og større minimumsvandføringer om sommeren – forhold der virker i retning af større vandløb, men i forhold til formudviklingen og størrelsestilpasningen vurderes de reducerede sommermiddelvandføringer at ville virke i modsat retning.

Det skyldes vandløbsvegetationen. Ved lav sommervandføring har især højt voksende og stivstænglede kantplanter mulighed for at vokse ind på vandløbsbunden. Man ved fra østdanske vandløb med et sådant vandføringsmønster – stor vintervandføring og lille sommervandføring – at de store vintervandføringer almindeligvis ikke er i stand til at bortskylle disse kantplanter, når de først har fået rodfæste. Og når planterne ikke bliver bortskyllet, begrænser de også erosionen ved de store vandføringer, og dermed begrænser de størrelsestilpasningen.

Vandløbets planter påvirker således formudviklingen og størrelsestilpasningen på en måde, der afføder forhøjede vandstande i forløbet frem mod en ny ligevægtstilstand mellem vandføring og størrelse.

Denne forsinkelse i størrelsestilpasningen betyder, at de ånære arealer vil kunne forvente forringelser af afvandingstilstanden som følge af øget afstrømning i vandløbene.

7.3. Foranstaltninger til klimatilpasning af vandløb

Orbicon har i redegørelsen til Norddjurs Kommune også set nærmere på, hvilke foranstaltninger i vandløbene, der kan tages i anvendelse for at imødegå vandstandshævninger som følge af øget afstrømning.

Ser man bort fra de lovgivningsbestemte og økonomiske begrænsninger i adgangen til at gennemføre foranstaltningerne, er der umiddelbart følgende muligheder: gradvis intensivering af grødeskæringen og/eller øgning af bundbredden, hvoraf sidstnævnte kan anses som at "hjælpe vandløbene på vej mod den nødvendige størrelsestilpasning".

Begge foranstaltninger lyder umiddelbart som nemme og effektive foranstaltninger, men det er de langt fra, hverken hvis man gradvis tilpasser vedligeholdelsen eller størrelsen til den gradvis stigende vandføring, eller hvis man i én omgang tilpasser vedligeholdelsen eller størrelsen til den fulde forventede øgning af vandføringen.

Som anført ovenfor er man ved en gradvis tilpasning nødt til at gøre en antagelse om størrelsen af den årlige øgning af vandføringen for at kunne omsætte denne til en gradvis øgning af skærebredden eller bundbredden. De nødvendige beregninger af indsatsbehovet kommer på den måde til at ske på grundlag af små tal, der er behæftet med stor usikkerhed. Det betyder, at det vil være umuligt at regne sig frem til retvisende billeder af indsatsbehovet i forbindelse med en gradvis tilpasning til den forventede øgede vandføring i vandløbene. Dertil kommer de praktiske problemer med at foretage så små justeringer af enten grødeskæringens omfang eller af profilstørrelsen.

Disse vanskeligheder og usikkerheder taler umiddelbart for at gennemføre foranstaltningerne i én eller nogle få omgange, idet man så bedre og med større sikkerhed kan regne sig frem til indsatsbehovet, og således at man rent praktisk nemmere kan gennemføre foranstaltningerne.

Gennemfører man indsatserne bagud i forhold til øgningen af vandføringen, vil man i tiden frem til gennemførelse af indsatserne opleve forhøjede vandstande i og omkring vandløbene, fordi vandløbene eller vedligeholdelsen i det meste af tiden er for små eller for begrænset i forhold til den øgede vandføring. Det svarer til, at man eksempelvis udskyder indsatsen over for de forventede øgninger af afstrømningen i år 2050 til det tidspunkt, hvor øgningerne faktisk har fundet sted.

Gennemfører man i stedet indsatserne forud i forhold til øgningen af afstrømningen, vil man omvendt skabe forhold, der i hovedparten af tiden er for store i forhold til den faktiske vandføring.

Det betyder jf. ovenstående, at vandløbene vil forsøge at indsnævre sig, enten ved at kantplanterne vokser ind på bunden og/eller ved at kantplanterne vokser ind på bunden og der skaber og fikserer aflejringer af sediment i form af brinkfodder. Denne ubalance mellem vandføringens størrelse og vandløbenes (strømrændens) størrelse vil vandløbene til stadighed forsøge at minimere ved at skabe et bedre afbalanceret forhold mellem vandføring og størrelse. Denne naturlige proces kan kun imødegås gennem en

løbende vedligeholdelse, hvad enten den består i grødeskæring i stor bundbredde eller opretholdelse af en for stor profilstørrelse.

Det betyder videre, at mens man med stor sikkerhed kan regne sig frem til omfanget af de nødvendige foranstaltninger, vil det efterfølgende behov for vedligeholdelse af den skabte tilstand være langt mere usikkert, både indholdsmæssigt og omfangsmæssigt. Disse mulige vanskeligheder og begrænsninger bør dog ikke afholde fra nytænkning. Der er allerede i forbindelse med Vandområdeplanen formuleret forslag til profilændringer, der kan beskytte vandløbene mod ødelæggende vedligeholdelse og samtidig skabe bedre afledning af store vandføringer. Det er vurderingen, at der eksisterer andre mulige profilændringer, hvis anvendelighed bør undersøges og vurderes, ikke blot som led i klimatilpasning, men i det hele taget.

Et muligt alternativ til øget bundbredde er uddybning af vandløbene. Uddybning lyder umiddelbart som den mest effektive foranstaltning til imødegåelse af de klimabetingede øgninger af vandføringens størrelse, men heller ikke denne foranstaltning er uden problemer, selv ikke hvis man alene ser på dens anvendelse i relation til afvandingsinteresserne. Dertil kommer, at uddybning ikke er en naturlig respons på øget vandføring, og uddybning skaber en ubalance, som kan have flere uønskede negative effekter, både vedligeholdelsesmæssigt (eks. udskridende brinker) og miljømæssigt (eks. færre planter og deraf følgende dårligere miljøforhold).

Uddybning af vandløb med ringe fald kan forværre eksisterende faldmæssige problemer og eksportere problemer til nedstrøms beliggende strækninger, eller effekten kan være meget ringe, fordi uddybningen ikke er ledsaget af sænket vandstand. Uddybning af vandløb bør derfor altid foregå under iagttagelse af helhederne for at undgå at skabe nye problemer ved løsningen af eksisterende problemer.

Uddybede vandløb har i lighed med udvidede vandløb det problem, at de fortsat skal vedligeholdes for at opretholde effekten af foranstaltningen. Et af de store problemer ved at uddybe vandløb er, at man tvinger flere af de store, energirige vandføringer til at passere gennem profilet uden mulighed for at aflaste gennem oversvømmelse. Det kan erfaringsmæssigt medføre øget erosion af brinkerne med deraf følgende udskridning af brinkerne og øget sedimenttransport.

Afslutningsvis skal det nævnes, at uanset hvilken foranstaltning man måtte vælge at tage i anvendelse, vil man ikke kunne eliminere risikoen for høje vandstande eller oversvømmelse i forbindelse skybrud. Skybrud vil altid forekomme uforudsigeligt i tid og rum, og de vil altid være størrelsesmæssigt uforudsigelige. Man kan derfor ikke regne sig frem til foranstaltninger i vandløb, der vil kunne sikre mod oversvømmelser eller forringede afvandingsforhold i forbindelse med skybrud. Med mindre at man indlægger en stor sikkerhedsmargin - og derved øger både indsatsbehovet og vedligeholdelsesbehovet yderligere. Hvorledes tilpasningen af vandløbene til at kunne aflede skybrud i givet fald kan foregå, er for nærværende uafklaret, men det skal pointeres, at hurtig afledning af nedbør fra arealerne i det åbne land kan være forbundet med problemer med oversvømmelse af byer og andre oversvømmelsesfølsomme arealer, jf. kapitel 8.1.

Klimaforandringerne taler derfor for helhedsbetragtninger af afstrømningen i hele oplande og vandløbssystemer.

7.4. Konklusion

Det er ukompliceret at beregne de vandstandsmæssige konsekvenser af bestemte øgninger af vandføringen i vandløb, men når det gælder de vandstandsmæssige konsekvenser af klimaforandringerne gælder det, at resultaterne af beregningerne vil være behæftet med meget stor usikkerhed på grund af usikkerheden på de vigtigste inputdata – den fremtidige vandførings størrelse og variation.

Det er også ukompliceret at beregne, hvilke foranstaltninger til imødegåelse af de klimabetingede øgninger af vandføringen i vandløb der skal til, men også resultaterne af disse beregninger er behæftet med meget stor usikkerhed på grund af usikkerheden på de vigtigste inputdata.

Mens beregningerne grundlæggende er ukomplicerede og giver retvisende resultater, så længe inputdata er gode, så er resultaterne behæftet med stor usikkerhed, når det gælder de klimabetingede øgninger af afstrømningen. Den usikkerhed kan man ikke med det nuværende vidensgrundlag fjerne.

Skybrud udgør et særligt problem i forhold til oversvømmelse eller anden form for forringelse af afvandingstilstanden omkring vandløb. Skybrud kan ikke forudses i hverken tid eller rum og er heller størrelsesmæssigt. Man vil derfor ikke kunne tilvejebringe det datamæssige grundlag for retvisende beregninger af de vandstandsmæssige konsekvenser af skybrud eller beregninger af de nødvendige tilpasninger af vedligeholdelsen eller profilstørrelsen til at imødegå skybrud. Når det gælder skybrud, bør indsatsen derfor også fokusere på foranstaltninger andre steder end i vandløbene.

Samlet set taler klimaforandringerne for et særskilt udredningsarbejde om muligheder og begrænsninger i forhold til at tilpasse vandløbene til de ændrede afstrømningsforhold, både de allerede stedfundne og de fremtidige.

8. REGNVAND FRA BEFÆSTEDE AREALER

Det hævdes ofte, at oversvømmelseshændelser i det åbne land skyldes byernes utilstrækkeligt forsinkede afledning af regnvand fra befæstede arealer.

Der er næppe nogen tvivl om, at der findes eksempler på steder, hvor afledningen af regnvand fra befæstede arealer er årsag eller medvirkende årsag til oversvømmelser af nedstrøms beliggende arealer. Men det synes ikke at være hovedreglen.

Der er i flere sammenhænge foretaget analyser af betydningen af regnvand fra befæstede arealer for oversvømmelser af de vandløbsnære arealer.

I regi af det af miljøministeren nedsatte Vandløbsudvalget (2004)³¹ og et efterfølgende projekt SPARC (2007)³² viste to analyser, at udledning af vand fra befæstede arealer har indflydelse på vandstanden i vandløbene, men at effekten af regnvandet fra de befæstede arealer er langt mindre end effekten af den samtidige afstrømning af overskudsnedbør fra de øvrige oplandsarealer. Hvorfor det konkluderes, at det ikke er udledningerne af regnvand fra befæstede arealer, der er de primære årsager til oversvømmelser omkring vandløbene.

Det skyldes, at selvom vandet fra de befæstede arealer i mange nedbørssituationer afledes hurtigere til vandløbene, end den nedbør, der falder på arealerne i det åbne land, så falder der ofte ikke "nok" vand på de befæstede arealer til at kunne forårsage oversvømmelser, og især ikke oversvømmelser med det omfang, der ligger til grund for at udpege de befæstede arealer som årsagen.

I tilfældet Lindenberg Å (SPARC, 2007) viste analyserne, at den maksimale afstrømning af regnvand fra de befæstede arealer svarer til i størrelsesordenen 6% af vandføringen i åen (normal maksimumsvandføring), altså en lille vandmængde, der under iagttagelse af varigheden af afstrømningen fra de befæstede arealer ikke kunne udpeges som årsagen til de tidvis store og meget omfattende oversvømmelser i store dele af ådalen omkring åen.

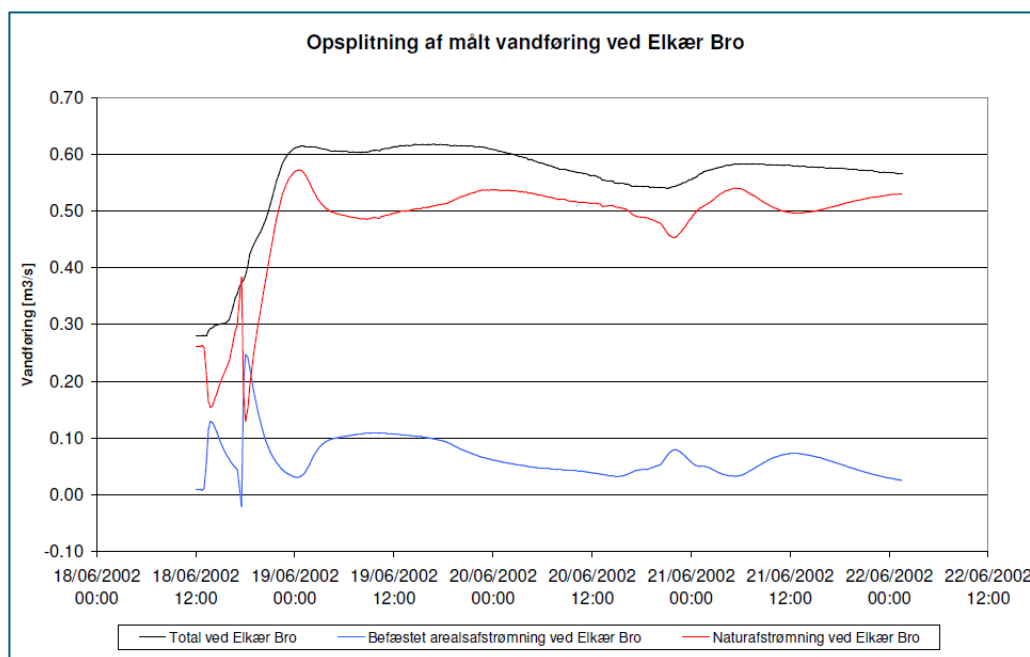
I tilfældet Lindholm Å (Vandløbsudvalget, 2004) viste analyserne, at afstrømningen fra befæstede arealer var årsag til en vandstandsstigning på ca. 0,2 m ud af en samlet vandstandsstigning på ca. 1,6 m. Det bemærkes, at den tidsmæssige forskel mellem afstrømningen fra de befæstede arealer og oplandsarealerne gør, at man ikke blot kan konkludere, at vandstandsstigningen kun ville have været 1,4 meter, hvis der ikke havde været afstrømning fra de befæstede arealer.

En hyppig årsag til, at vandet fra de befæstede arealer ikke bevirker oversvømmelser, er, at afstrømningen fra de befæstede arealer sker hurtigere end afstrømningen fra oplandsarealerne. Det betyder, at vandet fra de befæstede arealer påvirker vandføringen

³¹ http://www.sns.dk/erhvogadm/ferskvand/vandloebudvalg/pdf/rapport_rev1.pdf

³² <http://www.lindenbergaa.dk/LindenbergAadalAnalyseAfvandingsGroedeskaering2009.pdf>

og vandstanden i vandløbene endnu inden påvirkningen fra oplandsarealerne indtræder, og i kraft af den korte varighed af afstrømningen fra de befæstede arealer aftager effekten på vandføringen og vandstanden hurtigere end effekten af afstrømningen fra oplandsarealerne. Dette forhold gjorde sig gældende i analyserne i Lindholm Å (Vandløbsudvalget, 2004), hvor afstrømningen af regnvand fra de befæstede arealer skete forud for afstrømningen fra oplandsarealerne, se figur 8.1.



Figur 8.1. Opsplitning af en afstrømningshændelse i Lindholm Å i bidraget fra befæstede arealer og bidraget fra oplandsarealerne. Kilde: Skov og Naturstyrelsen 2004. Udlledning af overfladevand til Lindholm Å og Gerå.

En analyse af betydningen af udledningen af regnvand fra Viborg By til Nørreåen gav tilsvarende resultater (Hedeselskabet Energi og Miljø, 2004. De befæstede arealers betydning for afstrømnings- og vandstandsforhold i Nørreåen viste sig at være ubetydelig, uagtet at der i denne analyse var tale om en stor by beliggende højt oppe i et vandløbsopland.

Der forekommer dog også situationer, hvor afstrømningen af regnvand fra befæstede arealer finder sted på tidspunkter, hvor vandløbene allerede er fuldtløbende, enten på grund af stor vandføring eller på grund af høj vandstand som følge af tæt grøde. I sådanne situationer kan regnvand fra befæstede arealer "være dråben, der får bægeret til at flyde over", men på grund af den almindeligvis begrænsede mængde af regnvand i afstrømningshændelserne fra de befæstede arealer, vil oversvømmelserne ofte have begrænset omfang og udstrækning.

Endelig er der de tilfælde, hvor større byer afleder regnvand til små vandløb, og i sådanne tilfælde kan utilstrækkeligt forsinket afstrømning fra de befæstede arealer afstedkomme mere betydelige oversvømmelser af de vandløbsnære arealer, særlig i sommerhalvåret, når vandføringsevnen er reduceret på grund af grøde. Der findes dog også

eksempler på, at oversvømmelserne skyldes eller skabes af punktvis utilstrækkelig vandføringsevne i gamle vejbroer o.l.

Man har i dag stort fokus på at håndtere regnvandet fra befæstede arealer på en måde, så udledningerne gør mindst mulig skade, både i og omkring vandløbene. Det sker – og er i årtier sket³³ – ved at neddrøse afstrømningen fra de befæstede arealer til niveauer, der antages ikke at forårsage fysiske skader (erosion) i vandløbene, typisk 1-2 l/s/ha.

Det har i de senere år vist sig, at det generelle krav om 1-2 l/s/ha ikke i alle tilfælde giver den tilsigtede beskyttelse af vandløbene mod ødelæggende erosion mv., ligesom det i nogle tilfælde heller ikke giver den ønskede beskyttelse af nedstrøms arealer mod oversvømmelser. Førstnævnte er et problem i relation til opfyldelsen af de besluttede målsætninger for især vandløbene, mens sidstnævnte er et problem i relation til klimaplanlægningen.

Disse erkendelser har ført til, at man i dag arbejder langt mere fokuseret, nuanceret og innovativt med regnvandshåndteringen i byerne, både for at løse eksisterende problemer og for at imødegå de problemer, som klimaforandringerne forventes at kunne af føde.

Et led i dette arbejde er Orbicons nyligt igangsatte erhvervs-Ph.D.-projekt, der sigter mod at udvikle metoder og modeller til en mere aktiv og intelligent håndtering af byernes regnvand i forhold til de bindinger og interesser, der knytter sig til både vandløbene og deres omgivelser og til nedstrøms beliggende byer og andre oversvømmelsesfølsomme arealer.

Status i forhold til håndteringen af regnvand fra befæstede arealer er derfor, at der arbejdes målrettet på at undgå at skabe problemer i forbindelse med nye udledninger af regnvand fra befæstede arealer, samtidig med at der arbejdes på at løse de problemer, der måtte være i forbindelse med eksisterende udledninger, både i forhold til vandløbenes miljøtilstand og i forhold til risikoen for utilsigtede oversvømmelser.

Dette arbejde er begunstiget af mange års viden, adgang til nødvendige data og en række nye værktøjer, der til sammen gør det muligt at indtænke regnvandet fra befæstede arealer i den samlede hydrologiske "trafikplanlægning" for hele vandløbsoplande på måder, så løsningen af problemerne nogle steder ikke skaber nye problemer andre steder.

Selvom man ikke kan forudse alle nedbørshændelser i detaljer, hverken tidsligt eller rumligt, så sigter den intelligente regnvandshåndtering mod at gøre øget brug af meteorologiske data og hydrometriske data til en aktiv regulering af afstrømningen af regnvand fra byerne til vandløbene. Det giver bl.a. mulighed for målrettet at udlede regnvand

³³ Det skal nævnes, at regnvandshåndteringen langt fra alle steder er tilstrækkelig god til at sikre vandløbene mod skadelige påvirkninger af både forureningsmæssige og hydraulisk karakter, men det er vurderingen, at der i dag er fokus på at beskytte vandløbene mod skadelige påvirkninger og de vandløbsnære arealer mod uønskede oversvømmelser.

på tidspunkter, hvor vandløbene har kapacitet og robusthed til at klare øgede afstrømninger, og for at tilbageholde regnvand på tidspunkter, hvor kapaciteten er lille eller følsomheden over for øget afstrømning er stor.

8.1. Konklusion

Flere forskellige analyser af betydningen af regnvand fra byer for oversvømmelse af vandløbsnære arealer viser, at det i de konkrete tilfælde ikke var muligt at udpege regnvandsudledningerne som årsag til oplevede oversvømmelser.

Disse eksempler udelukker imidlertid ikke, at regnvand fra byer kan være årsag eller medvirkende årsag til oversvømmelser, og i erkendelse heraf arbejdes der i disse år med at optimere regnvandsafledningen fra byer med sigte på både at beskytte vandmiljøet mod ødelæggende forureningsmæssige og hydrauliske belastninger og mod at beskytte de vandløbsnære arealer mod uønskede oversvømmelser. Dette arbejde kan ses som led i bestræbelserne på at sikre en helhedsorienteret trafikafvikling på de danske vandveje, således at løsningen af nogle problemer ikke skaber andre problemer, og således at klimaforandringerne bliver tænkt ind i trafikplanlægningen for vandvejene så tidligt som muligt.

Det er i den forbindelse vigtigt at være opmærksom på, at helhedsorienteret forvaltning af vandløbene ikke blot er et spørgsmål om at skabe øget kapacitet i vandløbene til at kunne aflede de stigende mængder nedbør og nedbøren ved alle hændelser. Helhedsorienteret vandforvaltning vil også i nogle sammenhænge kunne være et spørgsmål om at mindske kapaciteten eller at undlade at øge kapaciteten i vandløbene for på den måde at mindske risikoen for oversvømmelse af byer og andre oversvømmelsesfølsomme arealer. Det kan eksempelvis ske ved at parkere dele af regnvandet midlertidigt på arealer, der kan tåle kortvarige oversvømmelser, eller som er blevet udpeget til midlertidige parkeringspladser for regnvand.

9. REFERENCER

- Næstved Kommune og Stevns Kommune m.fl. 2013. *Guidelines til opmåling af vandløb – På vej til en ny standard*. 25. november 2013
- Aslyng, H. C. 1970. *Afvanding i jordbruget*. Den Kongelige Veterinære- og Landbohøjskole. Jf. også senere udgaver.
- Engelund, F. A. og F. B. Pedersen 1974. *Hydraulik*. Den private Ingeniørfond og Danmarks tekniske Højskole.
- Feilberg, Aa. og C.L. Feilberg 1921. *Kulturteknisk Vandbygning*. Den Kongelige Veterinære- og Landbohøjskole.
- Feilberg, P. *Om Strømforhold*. Søborg 1891 – 94.
- Frich, P., S. Rosenørn, H. Madsen and J. J. Jensen 1997. *TECHNICAL REPORT 97-8. Observed Precipitation in Denmark, 1961-90*. DANISH METEOROLOGICAL INSTITUTE.
- GEUS 2013. *Klimaeffekter på hydrologi og afstrømning – klimaekstremvandføring*.
- Hedeselskabet Energi og Miljø 2004. *De befæstede arealers betydning for afstrømnings- og vandstandsforhold i Nørreå*.
- Landbrug & Fødevarer 2011. Konsekvensanalyser af ændret grødeskæring I vandløb. 1. Koncept for beregning af ændrede fugtighedsforhold omkring vandløb ved ændret grødeskæring. Teknisk redegørelse udarbejdet af Orbicon Leif Hansen (Orbicon).
- Larsen, T. 2017. *Manningtallet for vandløb – en udtømmelig kilde til diskussion*. Vand og Jord nr. 2, maj 2017, side 70-73.
- Mernild, S. H., B. Hasholt 2003. *Klassifikation af vandløb og ådale*. Vand og Jord, Nr. nr. 1, 2003, s. 21-23.
- Norrdjurs Kommune, 2014. *Klimatilpasning af vandløb. Klimaforandringernes betydning for afvandingstilstand og oversvømmelsesrisiko omkring vandløb og mulige virkemidler til klimatilpasning af vandløb*. Redegørelse udarbejdet af B. Moeslund og Klaus Schlünsen, Orbicon.
- Ovesen, N. B., S. E. Larsen, K. Schlünsen, B. Moeslund, L. M. K. Larsen 2015. *Afprøvnin g af forslag til metode til konsekvensvurdering af ændret vandløbsvedligeholdelse*. Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi.
- Schewior, G. 1921. *Hilfstafeln zur Bearbeitung von Meliorationsentwürfen*.

SPARC. <http://www.lindborgaa.dk/LindborgAadalAnalyseAfvandingGroedeskaering2009.pdf>

Vandløbsudvalget. http://www.sns.dk/erhvogadm/ferskvand/vandloebudvalg/pdf/rapport_rev1.pdf.

10. EFTERSKRIFT OG ANBEFALINGER

Denne faglige udredning og drøftelserne af dens indhold i følgegruppen har med stor tydelighed bekræftet, hvad man i mange år har vidst, nemlig at Manningtallet er den helt centrale parameter, når det gælder vandspejlsberegninger i vandløb ved brug af Manningformlen. Drøftelserne i følgegruppen har derudover vist, at Manningtallet og ikke mindst valget af Manningtal, tillige med hydraulisk radius vs. modstandsradius, er væsentlige kilder til de faglige diskussioner og den faglige uenighed, der ligger til grund for udarbejdelsen af denne faglige redegørelse.

Manningtallet benyttes som talmæssigt udtryk for den modstand, det strømmende vand er udsat for i vandløb, og vigtigheden af et retvisende Manningtal kommer til udtryk, både når man beregner de forventede effekter af foranstaltninger til mindske af modstanden, særlig grødeskæring, og når man beregner de forventede effekter af foranstaltninger, der kan øge modstanden, eksempelvis fysisk vandløbsrestaurering og formudvikling. Samt ikke mindst når man foretager kontrolberegninger af vandføringsevnen i vandløb, der administreres efter regulativtypen "teoretisk skikkelse".

I den udenlandske litteratur – og nu også i en dansk artikel - er det angivet, at den samlede ruhed i vandløb, i Danmark udtrykt ved Manningtallet, er bestemt af en række komponenter, der relaterer sig til vandløbenes fysiske karakteristika, og for hvilke der endvidere er angivet nogle talmæssige variationsintervaller.

Disse komponenter, der i denne redegørelse under ét er omtalt som formruheden, afspejler en faglig konstatering af, at forskellige fysiske faktorer påfører det strømmende vand en modstand, som ikke er til stede eller er ubetydelig i retlinede, ensartede og glatte vandløb i naturlig jordbund. En af disse faktorer er vandløbenes vegetation (grøde), og det er grunden til, at grødeskæring er det hyppigst benyttede virkemiddel til at øge vandløbenes vandføringsevne. De andre faktorer relaterer sig direkte til vandløbenes fysiske tilstand og angives alle at øge ruheden, sammenlignet med et retlinet, glat og ensformigt vandløb.

Det er denne formruhed og betydningen af den for vandføringsevnen, der har affødt de mest omfattende diskussioner i følgegruppen. Årsagen til disse diskussioner er, at mens effekten af grøde og grødeskæring er velkendt og veldokumenteret, om end ofte vanskelig at forudsige på grundlag af beregninger, så er det langt mere uafklaret, hvilken betydning det har for vandføringsevnen, når vandløb med sigte på opfyldelse af de vedtagne miljømålsætninger "får lov" til at udvikle sig i retning fra regulerede, ensformige kanaler til vandløb med større fysisk og formmæssig variation.

Der kan med afsæt i den udenlandske litteratur argumenteres for, at øget fysisk variation er ensbetydende med større ruhed, og dermed mindre vandføringsevne. Over for dette står spørgsmålet om, hvorfor vandløb så fra naturens side antager de fysisk og formmæssigt varierede forløb, som kendetegner vandløb i naturtilstanden.

Det har ikke inden for rammerne af denne faglige udredning været muligt at komme så langt som ønsket i besvarelsen af spørgsmålet om formruhedens betydning for vandføringsevnen og særlig ikke af spørgsmålet om formruhedens kvantitative og dermed praktiske betydning og håndterbarhed.

Amerikansk litteratur angiver ganske vist talmæssige variationsintervaller for Manning-tallets formkomponenter, men eftersom der er tale om intervaller, der hver især har betydelig spændvidde, kan værdierne ikke uden videre benyttes som grundlag for valg eller beregning af Manningtal, der korresponderer med vandløbenes fysiske tilstand. De er ikke for nærværende den viden, der skal til for at kunne beregne værdien af de enkelte ruhedskomponenter på grundlag af de opmålinger, der almindeligvis foretager i vandløb, eller som det kan vise sig nødvendigt at foretage, hvis ruhedskomponenterne skal kunne kvantificeres.

Det betyder i relation til et af redegørelsens fokuspunkter – regulativtypen teoretisk skikkelse – at det ikke på det foreliggende grundlag er muligt at afgøre, hvilken Manningtalsmæssig forskel der er mellem det geometriske profil og det opmålte profil. Det er derfor ikke muligt at basere kontrolberegningerne af vandføringsevnen på anvendelse af velbegrundede forskellige Manningtal, hvilket efterlader spørgsmålet om, hvorvidt fysisk og formmæssig udvikling i vandløbene er mulig uden forringelser af vandføringssevnen, ubesvaret.

Det er vigtigt at være opmærksom på, at manglende viden om ruhedskomponenternes størrelse gælder for både regulerede vandløb med geometrisk profil og vandløb med varieret fysisk form. I virkelighedens verden udviser nemlig også kanaliserede og vedligeholdte vandløb med geometrisk profil en Manningtalsmæssig afvigelse fra det ideelle, retlinede, glatte og ensartede vandløb, idet det – selv ikke gennem regelmæssig vedligeholdelse - er muligt at tilegne endsige opretholde minimal strømningsmodstand til alle tider. For at kunne kvantificere den Manningtalsmæssige forskel mellem kanaliserede vandløb med geometrisk profil og fysisk varierede vandløb må man derfor have viden om strømningsmodstanden i både de kanaliserede vandløb, som de ser ud i virkelighedens verden, og de fysiske varierede vandløb, som man ønsker de skal se ud af hensyn til målopfyldelsen.

Dette ubesvarede spørgsmål kan problematisere den fremtidige anvendelse af regulativtypen teoretisk skikkelse, ligesom manglende kvantificering af formruheden kan stille spørgsmålstejn ved, om de vandspejlsberegninger, der gennemføres forud for benyttelsen af virkemidler til forbedring af den fysiske vandløbskvalitet, giver retvisende resultater.

Følgegruppen udtrykker på denne baggrund ønske om, at formruheden i forlængelse af nærværende redegørelse underkastes en grundig faglig undersøgelse, dels med henblik på at få fænomenet belyst i relation til den nuværende og fremtidige vandløbsforvaltning, og dels - og ikke mindst - med henblik på at få Manningtallets komponenter kvantificeret for danske vandløb, således at formruheden – i fald den har væsentlig indflydelse på vandføringsevnen - kan gøres til en håndterbar og operationel parameter i

forbindelse med vandspejlsberegninger og kontrolberegninger af vandføringsevnen i vandløb.

Bilag 1 - Beregningseksempler

Alle beregningerne er udført på i et trapezformet profil med anlæg 1, det vil sige at brinkerne har en hældning på 45 grader.

Der er beregnet vandstande for 9 forskellige kombinationer af bundbredde og hældning:

- Bundbredde 1, 4 og 10 meter (valget af bredder er foretaget under hensyntagen til hyppigheden af vandløb i de tre størrelsesklasser),
- Hældning 0,1, 1 og 4 ‰.

Hvor intet andet er angivet, er dybder og bredder angivet i meter, mens vandhastigheder er angivet i m/s.

For hvert af de 9 regneeksempler, er der vist en række tabeller:

Den første tabel viser hastigheder og dybder i udgangstilstanden, det vil sige i tilstanden uden den foranstaltning, der regnes på (indsnævring henholdsvis bundhævning).

Station 0 er den opstrøms ende af den delstrækning, hvorpå der er foretaget ændringer i profilet. Station -10, -50 og -100 er beliggende 10, 50 og 100 meter opstrøms den delstrækning, hvorpå den konkrete foranstaltning er gennemført.

De følgende 3 tabeller viser dybde og vandhastighed ved 3 forskellige længder af de to fysiske foranstaltninger – profilindsnævring og bundhævning. Bilag 1.1.a-c viser beregningsresultaterne for 10, 50 og 100 meter lange profilindsnævninger, mens bilag 1.2.a-c viser beregningsresultaterne for 10, 50 og 100 meter lange bundhævninger.

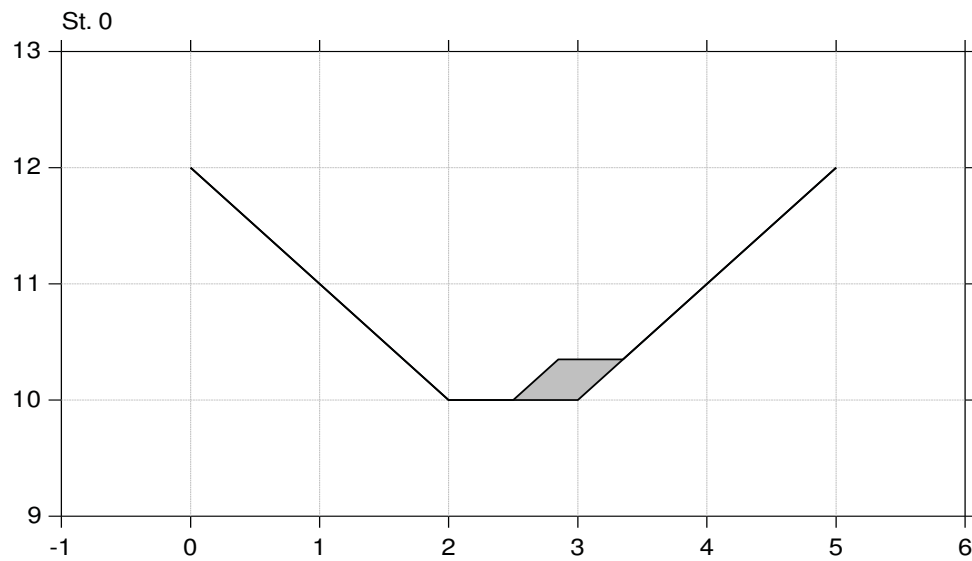
I hver af de 3 tabeller i bilag 1.1 og 1.2 er vist ændringerne af vanddybden og vandhastigheden i forhold til udgangstilstanden.

Lille Å

Indsnævring

Lodret akse : Kote i m DVR90, skala 1:50

Vandret akse : Afstand i m, skala 1:50



Lille vandløb

Indsnævring

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 40 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.09	0.09	0.09	0.09
Dybde	0.33	0.33	0.33	0.33

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.14	0.09	0.09	0.09
Dybde	0.33	0.34	0.33	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.14	0.09	0.09	0.09
Dybde	0.34	0.34	0.34	0.34

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	0.00	0.00	0.00
0.01	0.01	0.01	0.01

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.13	0.09	0.09	0.09
Dybde	0.35	0.35	0.35	0.35

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	0.00	0.00	0.00
0.02	0.02	0.02	0.01

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 400 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.18	0.18	0.18	0.18
Dybde	1.07	1.07	1.07	1.07

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.20	0.18	0.18	0.18
Dybde	1.07	1.07	1.07	1.07

Differens

0	-10	-50	-100
0.02	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.20	0.18	0.18	0.18
Dybde	1.07	1.07	1.07	1.07

Differens

0	-10	-50	-100
0.02	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.20	0.18	0.18	0.18
Dybde	1.07	1.07	1.07	1.07

Differens

0	-10	-50	-100
0.02	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Lille vandløb

Indsnævring

Hældning 1 ‰
Vandføring 120 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.28	0.28	0.28	0.28
Dybde	0.32	0.32	0.32	0.32

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.43	0.26	0.27	0.27
Dybde	0.34	0.34	0.33	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
0.15	-0.02	-0.01	-0.01
0.01	0.02	0.01	0.01

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.35	0.23	0.25	0.26
Dybde	0.37	0.37	0.36	0.35

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	-0.05	-0.03	-0.02
0.05	0.05	0.04	0.02

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.32	0.22	0.23	0.25
Dybde	0.39	0.39	0.37	0.36

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	-0.06	-0.04	-0.03
0.07	0.07	0.05	0.03

Hældning 1 ‰
Vandføring 1200 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.56	0.56	0.56	0.56
Dybde	1.04	1.04	1.04	1.04

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.61	0.56	0.56	0.56
Dybde	1.04	1.05	1.05	1.05

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.60	0.55	0.55	0.55
Dybde	1.06	1.06	1.06	1.05

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	-0.01	-0.01	-0.01
0.01	0.02	0.01	0.01

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.59	0.54	0.54	0.55
Dybde	1.07	1.07	1.07	1.06

Differens

0	-10	-50	-100
0.03	-0.02	-0.02	-0.02
0.03	0.03	0.02	0.02

Lille vandløb

Indsnævring

Hældning 4 ‰
Vandføring 250 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.56	0.56	0.56	0.56
Dybde	0.33	0.33	0.33	0.33

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.72	0.48	0.55	0.56
Dybde	0.38	0.38	0.34	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
0.15	-0.08	-0.02	0.00
0.05	0.04	0.01	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.60	0.44	0.53	0.56
Dybde	0.42	0.40	0.35	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	-0.12	-0.03	0.00
0.09	0.07	0.01	0.00

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.59	0.44	0.53	0.56
Dybde	0.42	0.41	0.35	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
0.03	-0.13	-0.03	0.00
0.09	0.07	0.02	0.00

Hældning 4 ‰
Vandføring 2500 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.14	1.14	1.14	1.14
Dybde	1.06	1.06	1.06	1.06

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.23	1.11	1.13	1.13
Dybde	1.07	1.08	1.07	1.07

Differens

0	-10	-50	-100
0.09	-0.03	-0.01	-0.01
0.00	0.02	0.01	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.16	1.07	1.10	1.12
Dybde	1.11	1.11	1.09	1.07

Differens

0	-10	-50	-100
0.02	-0.07	-0.04	-0.01
0.04	0.05	0.02	0.01

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.13	1.05	1.09	1.12
Dybde	1.12	1.12	1.09	1.08

Differens

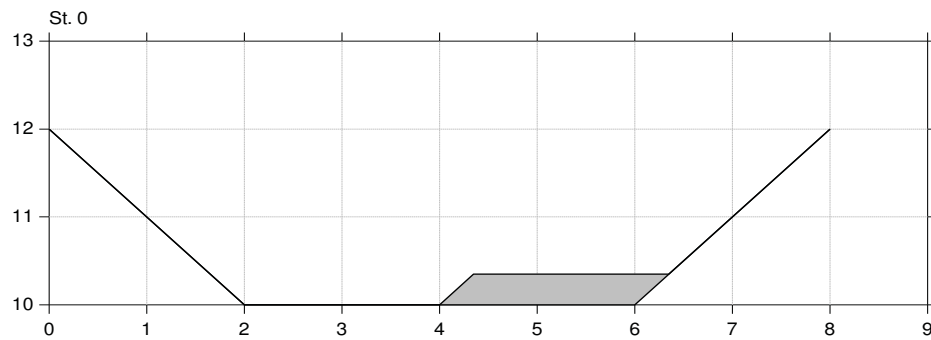
0	-10	-50	-100
-0.01	-0.09	-0.05	-0.02
0.06	0.06	0.03	0.01

Mellem Å

Indsnævring

Lodret akse : Kote i m DVR90, skala 1:50

Vandret akse : Afstand i m, skala 1:50



Mellem vandløb

Indsnævring

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 120 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.09	0.09	0.09	0.09
Dybde	0.31	0.31	0.31	0.31

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.17	0.09	0.09	0.09
Dybde	0.31	0.31	0.31	0.31

Differens

0	-10	-50	-100
0.08	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.16	0.09	0.09	0.09
Dybde	0.32	0.32	0.32	0.32

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	0.00	0.00	0.00
0.01	0.01	0.01	0.01

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.16	0.08	0.08	0.08
Dybde	0.33	0.33	0.33	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	-0.01	-0.01	-0.01
0.02	0.02	0.02	0.02

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 900 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.19	0.19	0.19	0.19
Dybde	0.97	0.97	0.97	0.97

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.22	0.19	0.19	0.19
Dybde	0.97	0.97	0.97	0.97

Differens

0	-10	-50	-100
0.03	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.22	0.19	0.19	0.19
Dybde	0.97	0.97	0.97	0.97

Differens

0	-10	-50	-100
0.03	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.22	0.19	0.19	0.19
Dybde	0.97	0.98	0.97	0.97

Differens

0	-10	-50	-100
0.03	0.00	0.00	0.00
0.01	0.01	0.01	0.01

Mellem vandløb

Indsnævring

Hældning 1 ‰
Vandføring 360 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.28	0.28	0.28	0.28
Dybde	0.30	0.30	0.30	0.30

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.49	0.26	0.26	0.27
Dybde	0.32	0.32	0.32	0.31

Differens

0	-10	-50	-100
0.21	-0.02	-0.02	-0.01
0.02	0.02	0.02	0.01

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.39	0.22	0.24	0.25
Dybde	0.37	0.37	0.35	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
0.11	-0.06	-0.04	-0.03
0.07	0.07	0.05	0.03

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.35	0.21	0.22	0.24
Dybde	0.39	0.39	0.37	0.35

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	-0.07	-0.06	-0.04
0.09	0.09	0.07	0.05

Hældning 1 ‰
Vandføring 2700 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.58	0.58	0.58	0.58
Dybde	0.94	0.94	0.94	0.94

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.68	0.57	0.57	0.57
Dybde	0.95	0.95	0.95	0.95

Differens

0	-10	-50	-100
0.10	-0.01	-0.01	0.00
0.00	0.01	0.01	0.01

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.66	0.56	0.56	0.56
Dybde	0.97	0.98	0.97	0.97

Differens

0	-10	-50	-100
0.08	-0.02	-0.02	-0.02
0.03	0.03	0.03	0.02

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.63	0.54	0.55	0.55
Dybde	0.99	1.00	0.99	0.98

Differens

0	-10	-50	-100
0.06	-0.04	-0.03	-0.03
0.05	0.05	0.05	0.04

Mellem vandløb

Indsnævring

Hældning 4 ‰
Vandføring 750 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.57	0.57	0.57	0.57
Dybde	0.31	0.31	0.31	0.31

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.79	0.46	0.54	0.56
Dybde	0.38	0.38	0.32	0.31

Differens

0	-10	-50	-100
0.22	-0.11	-0.03	0.00
0.07	0.07	0.01	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.64	0.42	0.52	0.56
Dybde	0.42	0.41	0.33	0.31

Differens

0	-10	-50	-100
0.08	-0.15	-0.05	0.00
0.12	0.10	0.03	0.00

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.63	0.40	0.51	0.56
Dybde	0.44	0.42	0.34	0.31

Differens

0	-10	-50	-100
0.06	-0.17	-0.06	-0.01
0.13	0.12	0.03	0.00

Hældning 4 ‰
Vandføring 5625 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.17	1.17	1.17	1.17
Dybde	0.97	0.97	0.97	0.97

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.36	1.12	1.15	1.16
Dybde	0.98	1.00	0.98	0.97

Differens

0	-10	-50	-100
0.18	-0.05	-0.02	-0.01
0.01	0.03	0.02	0.01

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.23	1.05	1.11	1.14
Dybde	1.05	1.06	1.02	0.99

Differens

0	-10	-50	-100
0.06	-0.12	-0.07	-0.03
0.08	0.09	0.05	0.02

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.18	1.03	1.09	1.13
Dybde	1.07	1.08	1.03	0.99

Differens

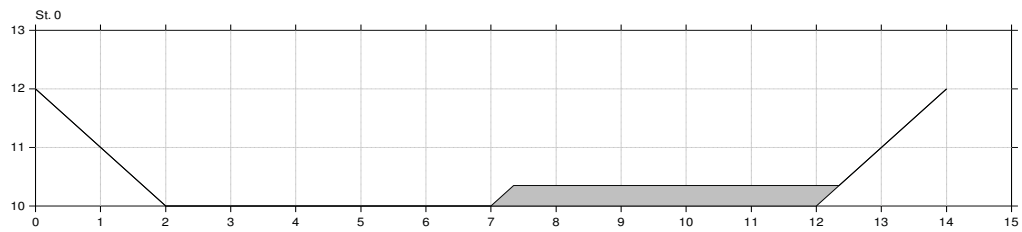
0	-10	-50	-100
0.01	-0.15	-0.09	-0.04
0.11	0.11	0.06	0.03

Store Å

Indsnævring

Lodret akse : Kote i m DVR90, skala 1:50

Vandret akse : Afstand i m, skala 1:50



Stort vandløb

Indsnævring

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 240 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.08	0.08	0.08	0.08
Dybde	0.28	0.28	0.28	0.28

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.16	0.08	0.08	0.08
Dybde	0.28	0.28	0.28	0.28

Differens

0	-10	-50	-100
0.08	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.16	0.08	0.08	0.08
Dybde	0.29	0.29	0.29	0.29

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	0.00	0.00	0.00
0.01	0.01	0.01	0.01

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.15	0.08	0.08	0.08
Dybde	0.30	0.30	0.30	0.30

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	-0.01	-0.01	-0.01
0.02	0.02	0.02	0.02

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 1200 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.16	0.16	0.16	0.16
Dybde	0.71	0.71	0.71	0.71

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.20	0.16	0.16	0.16
Dybde	0.71	0.71	0.71	0.71

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.20	0.16	0.16	0.16
Dybde	0.72	0.72	0.72	0.72

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	0.00	0.00	0.00
0.01	0.01	0.01	0.00

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.20	0.16	0.16	0.16
Dybde	0.72	0.72	0.72	0.72

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	0.00	0.00	0.00
0.01	0.01	0.01	0.01

Stort vandløb

Indsnævring

Hældning 1 ‰
Vandføring 750 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.27	0.27	0.27	0.27
Dybde	0.28	0.28	0.27	0.28

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.48	0.24	0.25	0.26
Dybde	0.29	0.30	0.29	0.28

Differens

0	-10	-50	-100
0.22	-0.02	-0.02	-0.01
0.02	0.03	0.02	0.01

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.40	0.21	0.22	0.24
Dybde	0.35	0.35	0.33	0.31

Differens

0	-10	-50	-100
0.13	-0.06	-0.04	-0.03
0.07	0.07	0.05	0.03

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.35	0.20	0.21	0.23
Dybde	0.37	0.37	0.35	0.32

Differens

0	-10	-50	-100
0.09	-0.07	-0.06	-0.04
0.10	0.10	0.07	0.05

Hældning 1 ‰
Vandføring 3750 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.49	0.49	0.49	0.49
Dybde	0.71	0.71	0.71	0.71

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.64	0.48	0.49	0.49
Dybde	0.71	0.72	0.72	0.72

Differens

0	-10	-50	-100
0.14	-0.01	-0.01	-0.01
0.00	0.01	0.01	0.01

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.59	0.46	0.47	0.47
Dybde	0.75	0.76	0.75	0.74

Differens

0	-10	-50	-100
0.10	-0.03	-0.03	-0.02
0.04	0.05	0.04	0.03

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.56	0.44	0.45	0.46
Dybde	0.78	0.79	0.77	0.76

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	-0.05	-0.04	-0.04
0.07	0.08	0.06	0.05

Stort vandløb

Indsnævring

Hældning 4 ‰
Vandføring 1500 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.53	0.53	0.53	0.53
Dybde	0.28	0.28	0.28	0.28

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.81	0.42	0.51	0.53
Dybde	0.34	0.35	0.29	0.28

Differens

0	-10	-50	-100
0.28	-0.11	-0.03	0.00
0.07	0.07	0.01	0.00

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.64	0.38	0.48	0.53
Dybde	0.40	0.38	0.30	0.28

Differens

0	-10	-50	-100
0.11	-0.15	-0.05	-0.01
0.12	0.11	0.03	0.00

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.62	0.38	0.48	0.53
Dybde	0.40	0.39	0.30	0.28

Differens

0	-10	-50	-100
0.09	-0.16	-0.05	-0.01
0.13	0.11	0.03	0.00

Hældning 4 ‰
Vandføring 7500 l/s

Indsnævring ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.99	0.99	0.99	0.99
Dybde	0.71	0.71	0.71	0.71

Indsnævring 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.21	0.91	0.95	0.98
Dybde	0.74	0.76	0.73	0.72

Differens

0	-10	-50	-100
0.23	-0.07	-0.04	-0.01
0.03	0.05	0.02	0.01

Indsnævring 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.05	0.84	0.91	0.96
Dybde	0.82	0.83	0.77	0.73

Differens

0	-10	-50	-100
0.06	-0.15	-0.08	-0.03
0.11	0.12	0.06	0.02

Indsnævring 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.01	0.82	0.89	0.95
Dybde	0.85	0.85	0.78	0.74

Differens

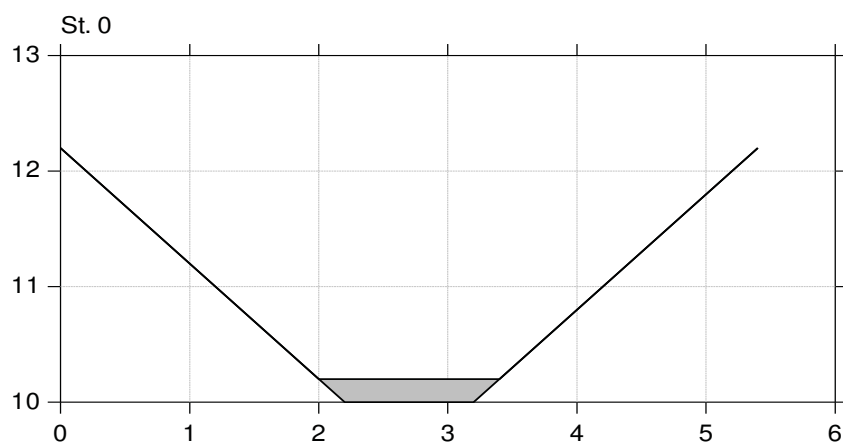
0	-10	-50	-100
0.02	-0.17	-0.10	-0.04
0.14	0.14	0.07	0.03

Lille Å

Bundhævning, delstrækning

Lodret akse : Kote i m DVR90, skala 1:50

Vandret akse : Afstand i m, skala 1:50



Lille vandløb Bundhævning, delstrækning

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 40 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.09	0.09	0.09	0.09
Dybde	0.33	0.33	0.33	0.33

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.18	0.09	0.09	0.09
Dybde	0.14	0.35	0.34	0.34

Differens

0	-10	-50	-100
0.09	0.00	0.00	0.00
-0.19	0.01	0.01	0.01

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.15	0.08	0.08	0.08
Dybde	0.17	0.37	0.37	0.37

Differens

0	-10	-50	-100
0.06	-0.01	-0.01	-0.01
-0.16	0.04	0.04	0.04

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.13	0.07	0.07	0.07
Dybde	0.19	0.39	0.39	0.39

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	-0.02	-0.02	-0.02
-0.14	0.06	0.06	0.05

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 400 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.18	0.18	0.18	0.18
Dybde	1.07	1.07	1.07	1.07

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.20	0.18	0.18	0.18
Dybde	0.87	1.07	1.07	1.07

Differens

0	-10	-50	-100
0.02	0.00	0.00	0.00
-0.20	0.00	0.00	0.00

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.20	0.18	0.18	0.18
Dybde	0.87	1.07	1.07	1.07

Differens

0	-10	-50	-100
0.02	0.00	0.00	0.00
-0.20	0.00	0.00	0.00

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.20	0.18	0.18	0.18
Dybde	0.87	1.07	1.07	1.07

Differens

0	-10	-50	-100
0.02	0.00	0.00	0.00
-0.19	0.00	0.00	0.01

Lille vandløb Bundhævning, delstrækning

Hældning 1 ‰
Vandføring 120 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.28	0.28	0.28	0.28
Dybde	0.32	0.32	0.32	0.32

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.40	0.22	0.23	0.25
Dybde	0.19	0.39	0.37	0.35

Differens

0	-10	-50	-100
0.12	-0.06	-0.04	-0.03
-0.13	0.07	0.05	0.03

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.30	0.19	0.21	0.22
Dybde	0.24	0.44	0.41	0.39

Differens

0	-10	-50	-100
0.02	-0.09	-0.07	-0.05
-0.08	0.12	0.09	0.06

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.28	0.18	0.20	0.22
Dybde	0.26	0.46	0.43	0.40

Differens

0	-10	-50	-100
0.00	-0.10	-0.08	-0.06
-0.06	0.13	0.11	0.07

Hældning 1 ‰
Vandføring 1200 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.56	0.56	0.56	0.56
Dybde	1.04	1.04	1.04	1.04

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.63	0.56	0.56	0.56
Dybde	0.84	1.05	1.05	1.05

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	0.00	0.00	0.00
-0.20	0.01	0.00	0.00

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.61	0.54	0.55	0.55
Dybde	0.86	1.07	1.06	1.06

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	-0.02	-0.02	-0.01
-0.18	0.03	0.02	0.02

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.60	0.53	0.54	0.54
Dybde	0.88	1.09	1.08	1.07

Differens

0	-10	-50	-100
0.03	-0.03	-0.03	-0.02
-0.16	0.04	0.04	0.03

Lille vandløb Bundhævning, delstrækning

Hældning 4 ‰
Vandføring 250 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.56	0.56	0.56	0.56
Dybde	0.33	0.33	0.33	0.33

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.60	0.40	0.51	0.56
Dybde	0.25	0.43	0.36	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	-0.16	-0.05	0.00
-0.08	0.10	0.03	0.00

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.53	0.37	0.49	0.56
Dybde	0.28	0.46	0.37	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
-0.03	-0.19	-0.07	-0.01
-0.05	0.13	0.04	0.00

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.52	0.37	0.49	0.56
Dybde	0.28	0.46	0.37	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
-0.04	-0.20	-0.07	-0.01
-0.05	0.13	0.04	0.00

Hældning 4 ‰
Vandføring 2500 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.14	1.14	1.14	1.14
Dybde	1.06	1.06	1.06	1.06

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.26	1.10	1.12	1.13
Dybde	0.87	1.09	1.08	1.07

Differens

0	-10	-50	-100
0.12	-0.04	-0.02	-0.01
-0.19	0.03	0.01	0.01

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.16	1.03	1.08	1.12
Dybde	0.93	1.13	1.10	1.08

Differens

0	-10	-50	-100
0.02	-0.11	-0.05	-0.02
-0.14	0.07	0.04	0.01

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.12	1.01	1.07	1.11
Dybde	0.95	1.15	1.11	1.08

Differens

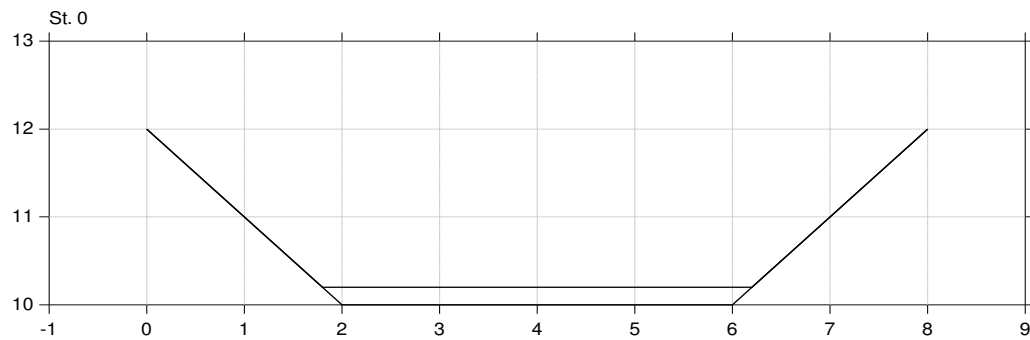
0	-10	-50	-100
-0.02	-0.13	-0.07	-0.03
-0.11	0.09	0.05	0.02

Mellem Å

Bundhævning, delstrækning

Lodret akse : Kote i m DVR90, skala 1:50

Vandret akse : Afstand i m, skala 1:50



Mellem vandløb

Bundhævning

delstrækning

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 120 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.09	0.09	0.09	0.09
Dybde	0.31	0.31	0.31	0.31

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.21	0.08	0.08	0.08
Dybde	0.13	0.33	0.33	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
0.12	-0.01	-0.01	-0.01
-0.18	0.02	0.02	0.02

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.16	0.08	0.08	0.08
Dybde	0.17	0.37	0.36	0.36

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	-0.02	-0.02	-0.01
-0.14	0.06	0.05	0.05

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.14	0.07	0.07	0.07
Dybde	0.19	0.39	0.39	0.38

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	-0.02	-0.02	-0.02
-0.12	0.08	0.08	0.07

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 900 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.19	0.19	0.19	0.19
Dybde	0.97	0.97	0.97	0.97

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.23	0.19	0.19	0.19
Dybde	0.77	0.97	0.97	0.97

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	0.00	0.00	0.00
-0.20	0.00	0.00	0.00

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.23	0.19	0.19	0.19
Dybde	0.77	0.97	0.97	0.97

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	0.00	0.00	0.00
-0.20	0.01	0.00	0.01

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.22	0.19	0.19	0.19
Dybde	0.78	0.98	0.98	0.98

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	0.00	0.00	0.00
-0.19	0.01	0.01	0.01

Mellem vandløb

Bundhævning

delstrækning

Hældning 1 ‰
Vandføring 360 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.28	0.28	0.28	0.28
Dybde	0.30	0.30	0.30	0.30

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.41	0.21	0.22	0.24
Dybde	0.19	0.39	0.37	0.35

Differens

0	-10	-50	-100
0.14	-0.07	-0.05	-0.04
-0.11	0.09	0.07	0.04

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.32	0.18	0.20	0.22
Dybde	0.25	0.44	0.41	0.38

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	-0.10	-0.08	-0.06
-0.05	0.14	0.11	0.08

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.29	0.17	0.19	0.21
Dybde	0.27	0.46	0.43	0.40

Differens

0	-10	-50	-100
0.01	-0.10	-0.09	-0.07
-0.03	0.16	0.13	0.10

Hældning 1 ‰
Vandføring 2700 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.58	0.58	0.58	0.58
Dybde	0.94	0.94	0.94	0.94

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.70	0.57	0.57	0.57
Dybde	0.75	0.96	0.95	0.95

Differens

0	-10	-50	-100
0.12	-0.01	-0.01	-0.01
-0.20	0.01	0.01	0.01

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.67	0.55	0.55	0.56
Dybde	0.78	0.99	0.98	0.98

Differens

0	-10	-50	-100
0.09	-0.03	-0.03	-0.02
-0.16	0.04	0.04	0.03

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.64	0.53	0.54	0.54
Dybde	0.81	1.02	1.01	1.00

Differens

0	-10	-50	-100
0.06	-0.05	-0.04	-0.04
-0.13	0.07	0.06	0.05

Mellem vandløb

Bundhævning

delstrækning

Hældning 4 ‰
Vandføring 750 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.57	0.57	0.57	0.57
Dybde	0.31	0.31	0.31	0.31

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.64	0.39	0.50	0.56
Dybde	0.25	0.44	0.35	0.31

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	-0.18	-0.07	-0.01
-0.05	0.13	0.04	0.00

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.56	0.36	0.47	0.55
Dybde	0.29	0.47	0.36	0.31

Differens

0	-10	-50	-100
-0.01	-0.21	-0.09	-0.01
-0.02	0.16	0.06	0.01

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.55	0.36	0.47	0.55
Dybde	0.29	0.47	0.36	0.32

Differens

0	-10	-50	-100
-0.02	-0.21	-0.09	-0.01
-0.02	0.16	0.06	0.01

Hældning 4 ‰
Vandføring 5625 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.17	1.17	1.17	1.17
Dybde	0.97	0.97	0.97	0.97

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.38	1.11	1.14	1.16
Dybde	0.78	1.01	0.99	0.98

Differens

0	-10	-50	-100
0.21	-0.07	-0.03	-0.01
-0.18	0.05	0.03	0.01

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.22	1.02	1.08	1.13
Dybde	0.87	1.08	1.03	1.00

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	-0.15	-0.09	-0.04
-0.09	0.12	0.07	0.03

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.17	0.99	1.06	1.12
Dybde	0.91	1.11	1.05	1.01

Differens

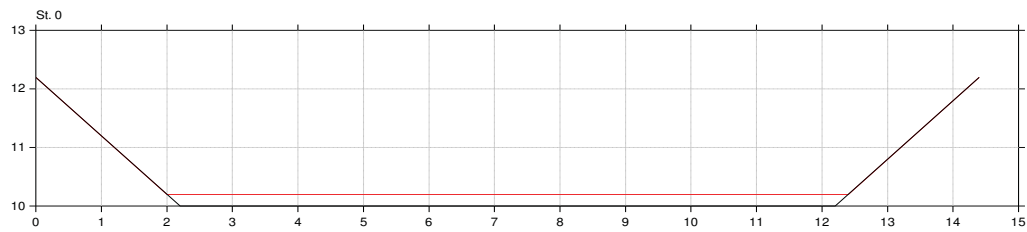
0	-10	-50	-100
0.00	-0.18	-0.11	-0.05
-0.06	0.14	0.08	0.04

Store Å

Bundhævning, delstrækning

Lodret akse : Kote i m DVR90, skala 1:50

Vandret akse : Afstand i m, skala 1:50



Stort vandløb

Bundhævning

delstrækning

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 240 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.08	0.08	0.08	0.08
Dybde	0.28	0.28	0.28	0.28

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.21	0.08	0.08	0.08
Dybde	0.11	0.31	0.31	0.31

Differens

0	-10	-50	-100
0.12	-0.01	-0.01	-0.01
-0.17	0.03	0.03	0.03

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.15	0.07	0.07	0.07
Dybde	0.15	0.35	0.35	0.35

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	-0.02	-0.02	-0.02
-0.13	0.07	0.07	0.07

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.13	0.06	0.06	0.06
Dybde	0.17	0.37	0.37	0.37

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	-0.02	-0.02	-0.02
-0.10	0.10	0.09	0.09

Hældning 0.1 ‰
Vandføring 1200 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.16	0.16	0.16	0.16
Dybde	0.71	0.71	0.71	0.71

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.21	0.16	0.16	0.16
Dybde	0.51	0.72	0.72	0.72

Differens

0	-10	-50	-100
0.06	0.00	0.00	0.00
-0.20	0.00	0.00	0.00

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.21	0.16	0.16	0.16
Dybde	0.52	0.72	0.72	0.72

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	0.00	0.00	0.00
-0.19	0.01	0.01	0.01

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.21	0.15	0.15	0.15
Dybde	0.53	0.73	0.73	0.73

Differens

0	-10	-50	-100
0.05	0.00	0.00	0.00
-0.18	0.02	0.02	0.02

Stort vandløb

Bundhævning

delstrækning

Hældning 1 ‰
Vandføring 750 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.27	0.27	0.27	0.27
Dybde	0.28	0.28	0.27	0.28

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.40	0.19	0.21	0.22
Dybde	0.18	0.38	0.35	0.33

Differens

0	-10	-50	-100
0.13	-0.07	-0.06	-0.04
-0.10	0.10	0.08	0.05

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.30	0.17	0.18	0.20
Dybde	0.23	0.43	0.40	0.36

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	-0.10	-0.08	-0.07
-0.04	0.15	0.12	0.09

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.28	0.16	0.17	0.19
Dybde	0.25	0.45	0.41	0.38

Differens

0	-10	-50	-100
0.01	-0.10	-0.09	-0.08
-0.02	0.17	0.14	0.11

Hældning 1 ‰
Vandføring 3750 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.49	0.49	0.49	0.49
Dybde	0.71	0.71	0.71	0.71

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.66	0.48	0.48	0.48
Dybde	0.52	0.73	0.73	0.72

Differens

0	-10	-50	-100
0.17	-0.02	-0.01	-0.01
-0.19	0.02	0.02	0.01

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.60	0.45	0.45	0.46
Dybde	0.57	0.78	0.77	0.76

Differens

0	-10	-50	-100
0.10	-0.05	-0.04	-0.03
-0.14	0.07	0.06	0.05

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.56	0.43	0.44	0.44
Dybde	0.61	0.81	0.80	0.78

Differens

0	-10	-50	-100
0.06	-0.07	-0.06	-0.05
-0.10	0.10	0.09	0.07

Stort vandløb

Bundhævning

delstrækning

Hældning 4 ‰
Vandføring 1500 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.53	0.53	0.53	0.53
Dybde	0.28	0.28	0.28	0.28

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.60	0.35	0.46	0.52
Dybde	0.23	0.42	0.32	0.28

Differens

0	-10	-50	-100
0.07	-0.19	-0.07	-0.01
-0.04	0.14	0.04	0.00

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.53	0.33	0.44	0.52
Dybde	0.27	0.44	0.33	0.28

Differens

0	-10	-50	-100
0.00	-0.21	-0.10	-0.01
-0.01	0.17	0.06	0.01

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.52	0.32	0.44	0.52
Dybde	0.27	0.44	0.33	0.28

Differens

0	-10	-50	-100
-0.01	-0.21	-0.10	-0.01
-0.01	0.17	0.06	0.01

Hældning 4 ‰
Vandføring 7500 l/s

Bundhævning ingen

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.99	0.99	0.99	0.99
Dybde	0.71	0.71	0.71	0.71

Bundhævning 10 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.22	0.88	0.94	0.97
Dybde	0.56	0.79	0.75	0.72

Differens

0	-10	-50	-100
0.23	-0.10	-0.05	-0.02
-0.15	0.08	0.04	0.01

Bundhævning 50 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	1.03	0.80	0.88	0.94
Dybde	0.66	0.86	0.79	0.74

Differens

0	-10	-50	-100
0.04	-0.18	-0.11	-0.04
-0.05	0.15	0.08	0.03

Bundhævning 100 m

Station	0	-10	-50	-100
Hastighed	0.99	0.78	0.86	0.93
Dybde	0.68	0.88	0.80	0.75

Differens

0	-10	-50	-100
0.00	-0.21	-0.12	-0.05
-0.03	0.17	0.09	0.04



Hedeselskabet 2016

Feltforsøg med profilændringer i Kimmerslev Møllebæk november 2015

FORSØGSRAPPORT
BILAG 2 TIL FAGLIG UDREDNING

Hedeselskabet 2016

Feltforsøg med profilændringer i Kimmerslev Møllebæk november 2015

FORSØGSRAPPORT - BILAG 2 TIL FAGLIG UDREDNING

Rekvirent	Hedeselskabet Klostermarken 12 Postboks 91 8800 Viborg Att.: Vibeke Højen
Rådgiver	Orbicon A/S Jens Juuls Vej 16 8260 Viby
Projektnummer	3691400149
Projektleder	Bjarne Moeslund
Analyser, beregninger og tekst	Inger Klint Jensen & Klaus Schlüsen
Kvalitetssikring	Lars Bo Christensen & Morten Larsen
Revisionsnr.	Udkast
Godkendt af	Henrik Vest Sørensen
Udgivet	15-04-2016

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. FORSØG I KIMMERSLEV MØLLEBÆK	5
1.1. Forsøgslokalitet.....	5
2. FORSØGSBESKRIVELSE	8
2.1. Klargøring inden selve forsøgsdagen	8
2.2. Opsætning af målestationer og skalapæle	9
2.3. Opmåling af forsøgsstrækningen.....	10
2.4. Vandføringsmåling og aflæsning af skalapæle inden forsøg	11
3. FORSØGSOPSTILLINGER.....	12
3.1. Store sten i vandløbsprofilet	12
3.2. Indsnævring af vandløbsprofilet.....	13
3.3. Bundhævning	13
3.4. Stryg.....	14
3.5. Regulativkontrol	15
4. RESULTATER	17
4.1. Vandføringsmålinger og Manningtalsbestemmelse.....	17
4.2. Forsøg 1: udlægning af store sten.....	18
4.3. Forsøg 2: profilindsnævring	19
4.4. Forsøg 3 og 4 - bundhævning og stryg.....	21
4.5. Konklusion og bemærkninger til feltforsøg	22
5. PRAKTISKE FORSØG OG BEREKNINGER	24
5.1. Profilindsnævringer	24
5.2. Bundhævninger og stryg.....	25
5.3. Sammenligning af Stationære beregninger i MIKE 11 og VASP...27	
5.4. Konklusion	27

BILAGSFORTEGNELSE

Som bilag til rapporten er udarbejdet en lang række længdeprofiler med beregnede vandspejlsforløb og observerede vandspejl ved forsøgene i Kimmerslev Møllebæk:

Bilag 1: Længdeprofil med resultater for forsøg vedrørende profilindsnævninger

Bilag 1a: Længdeprofil med resultater for forsøg, profilindsnævninger 1 meter

Bilag 1b: Længdeprofil med resultater for forsøg, profilindsnævninger 2 meter

Bilag 1c: Længdeprofil med resultater for forsøg, profilindsnævninger 5 meter

Bilag 1d: Længdeprofil med resultater for forsøg, profilindsnævninger 10 meter

Bilag 2: Længdeprofil med resultater for forsøg vedrørende bundhævninger

Bilag 2a: Længdeprofil med resultater for forsøg, bundhævninger 1 meter

Bilag 2b: Længdeprofil med resultater for forsøg, bundhævninger 2 meter

Bilag 2c: Længdeprofil med resultater for forsøg, bundhævninger 5 meter

Bilag 2d: Længdeprofil med resultater for forsøg, stryg

1. FORSØG I KIMMERSLEV MØLLEBÆK

I forbindelse med projektet "Beregningsmæssige forudsætninger for vandspejlsberegninger i vandløb" blev der gennemført en række feltforsøg i Kimmerslev Møllebæk i Køge Kommune den 19. november 2015.

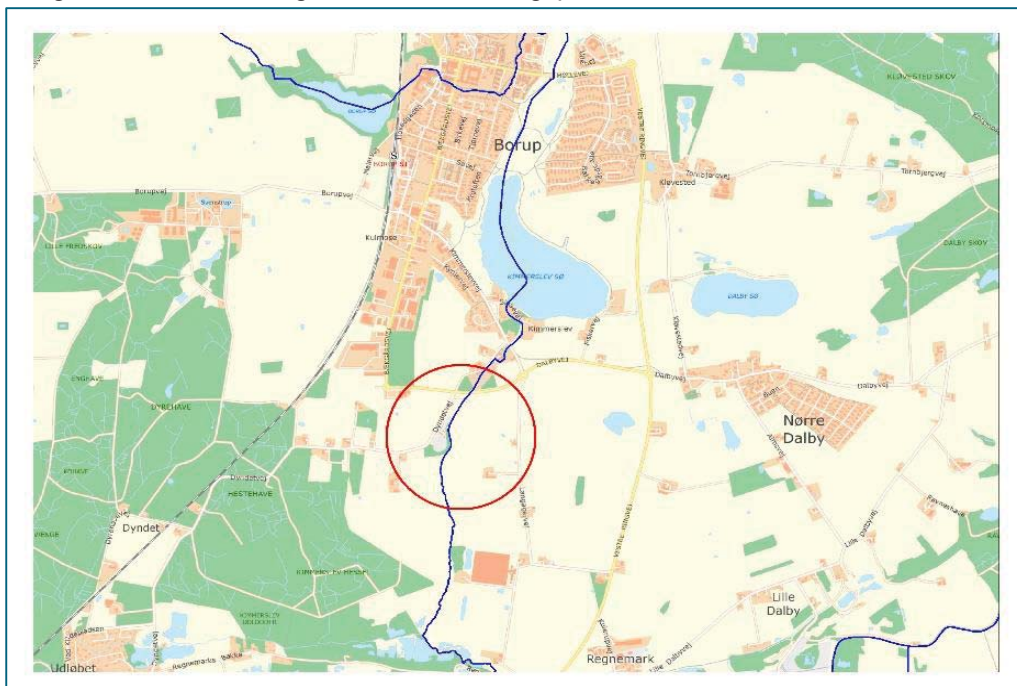
Formålet med forsøgene var at registrere og dokumentere vandspejlsændringer i forbindelse med forskellige ændringer af vandløbets fysiske tilstand (scenarier) i form af udlægning af store sten, indsnævring af profilet og bundhævning.

De forskellige fysiske forandringer blev opmålt, således at der efterfølgende kunne udføres beregninger i VASP af de resulterende vandstande i hvert af scenarierne. På denne måde kan man sammenligne de målte vandspejlsændringer med de beregnede vandspejlsændringer, for på den måde at kunne sammenligne beregnede vandstandsændringer med faktisk stedfundne vandstandsændringer.

1.1. Forsøgslokalitet

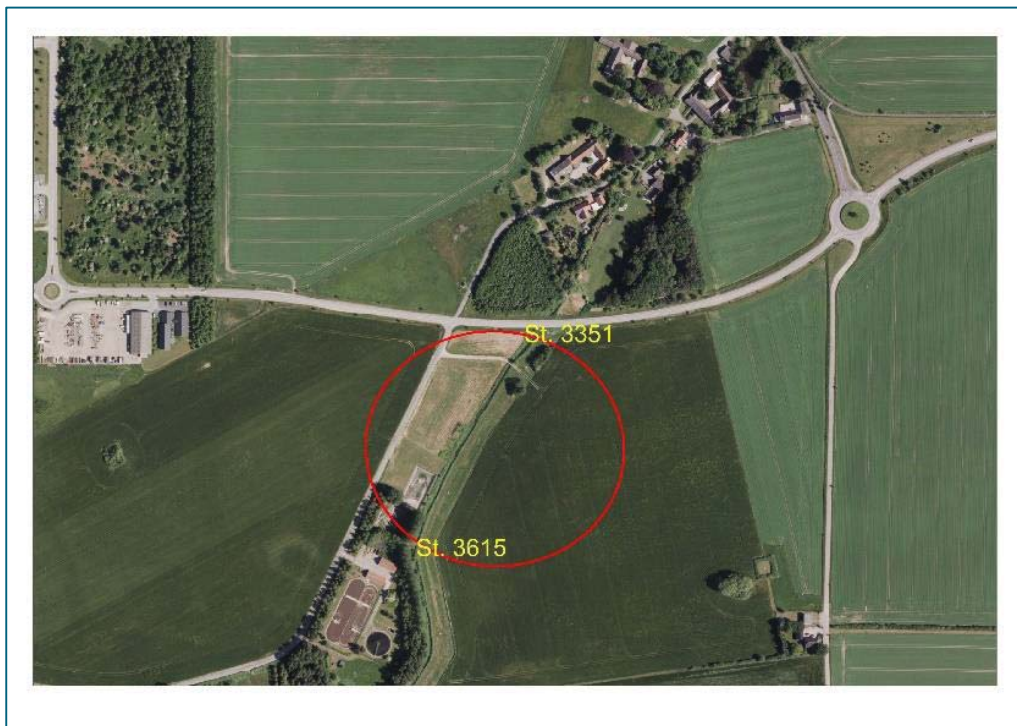
I samarbejde med Køge Kommune blev der udvalgt en forsøgsstrækning i Kimmerslev Møllebæk nedstrøms Kimmerslev Sø, se Figur 1.

For at minimere usikkerhederne på beregningerne, er det vigtigt at vandføringen på forsøgsdagen er så konstant som muligt. Den valgte forsøgsstrækning egner sig særligt godt til forsøg, da den opstrøms beliggende sø har en dæmpende effekt på vandføringen. Dertil kommer, at der i den nedstrøms Møllesø er stemmeværker, der gjorde det muligt at holde vandføringen konstant i forsøgsperioden.



Figur 1: Oversigtskort over beliggenheden af forsøgsstrækningen i Kimmerslev Møllebæk i Køge Kommune.

Forsøgsstrækningen i Kimmerslev Møllebæk er afgrænset af regulativmæssig st. 3351 til st. 3615, se Figur 2.



Figur 2: Forsøgsstrækningen i Kimmerslev Møllebæk, st. 3351-3615.

Forud for forsøgsdagen var der søgt tilladelse til at udføre forsøget og færdes på areaerne hos de respektive lodsejere.

Forsøgsstrækningen har følgende bredejere på højre side af vandløbet:

- *Køge Kommune*
- *Anders Frandsen, Borup*
- *Energiforsyningen, Køge,*

og følgende bredejer på venstre side af vandløbet:

- *HOFOR.*

Perioden op til selve forsøgsdagen var meget tør, og vandføringen i Kimmerslev Møllebæk var derfor ringe. Da forsøgene bliver mere retvisende ved en større vandføring, blev der taget kontakt til Mølleeejeren, således at der på forsøgsdagen kunne lukkes mere vand ud af søen. En større vandføring er samtidig med til at mindske de variationer og usikkerheder på aflæsninger af vandspejl mv. Det blev aftalt med mølleeejeren, hvor meget vandføringen kunne øges med, således at det nedre flodemål i søen fortsat kunne holdes.

Køge Kommune, der har været en yderst aktiv samarbejdspartner og medvirkende til at forsøget kunne gennemføres, har i skrivelse af 16. november 2015 givet tilladelse til at udføre selve forsøget og til, at der på forsøgstidspunktet blev givet tilladelse til at øge vandføringen i afløbet fra søen.

HedeDanmark deltog med maskinfører, maskiner og levering af materialer på forsøgsdagen, og den erfarne maskinfører udførte den praktiske del af forsøget med stor akkurate i udlægningen af sten og grus.



Figur 3: Den praktiske del af forsøget blev udført med bistand fra HedeDanmark, mens opmåling og vandføringsmålinger blev udført af Orbicon.

Opmåling, vandføringsmålinger og opsætning af vandstandsloggere m.v. blev udført af medarbejdere fra Orbicon. Aflæsning af vandstande blev ligeledes udført af medarbejdere fra Orbicon med assistance på dagen af Peter Hyldegaard, der repræsenterer Enviro i projektets følgegruppe.

2. FORSØGSBESKRIVELSE

Forsøget bestod i hovedtræk af 4 forskellige scenarier. I det første scenarie observeres vandspejlsstigninger i forbindelse med trinvis udlægning af stadig flere større sten i vandløbsprofilen for at se effekter af et meget varieret vandløbsprofil. I det følgende scenarie foretages trinvis indsnævring af vandløbsprofilen, mens den tredje forsøgsrække viser effekten af trinvis bundhævninger, mens det sidste scenarie viser effekten af et stryg/spærring i vandløbet.

Alle forsøg blev tilrettelagt og gennemført med henblik på, at der skulle kunne observeres en målelig vandspejlsstigning. Havde man valgt at lave mindre omfattende indgreb i vandløbet ville vandspejlsstigningerne have været mindre – hvorved det kan være svært at afgøre om en lille vandspejlsstigning skyldes forsøg eller måleusikkerhed ved aflæsning af vandspejl. Herudover er der også større underholdningsværdi i at ”der sker noget” der både kan ses og måles.

2.1. Klargøring inden selve forsøgssdagen

Orbicon har igennem en årrække udført kontrolopmålinger for Køge Kommune. På baggrund af det store antal opmålinger der er indlagt i Orbicons vandspejlsberegningsprogram VASP samt Køge Kommunes VandløbsGIS database er der udført et analysearbejde med henblik på at finde en velegnet forsøgsstrækning.

Forsøget skal først og fremmest kunne afgrænses opadtil, således at der ikke er vandspejlsmæssige konsekvenser af forsøgene langt op i vandløbet – med deraf følgende mange lodsejere der skulle indhentes tilladelse fra.

Bundbredden skal ikke være for smal, der skal være plads i profilen til at lave scenarier, men samtidig heller ikke så bredt af udgifterne til materialer (sten og grus) bliver dyrere end højest nødvendigt.

Endelig var det vigtigt, at vandføringen ikke varierer for meget på selve forsøgssdagen, hvilket vil vanskeliggøre vurderingen af, om en vandspejlsstigning skyldes forsøget eller blot en ændring i vandføringen.

Valget faldt således på den aktuelle strækning af Kimmerslev Møllebæk, da strækningen som tidligere nævnt ligger nedstrøms en sø, der har en dæmpende effekt på variationen af vandføringen. Herudover er der et fald på ca. 2,2 promille samt et lille styrt opstrøms forsøgsstrækningen, faktorer der gør, at konsekvenserne af forsøget kan afgrænses opadtil. Endelig er bundbredden 1,8 meter.

Ud over Køge Kommune er der kun 3 lodsejere, hvoraf de to er forsyninger (Køge Energiforsyning og HOFOR), hvilket også har gjort tilladelse til forsøg og færdsel på arealerne lettere, da det ikke var arealer i omdrift.

Da forsøgsstrækningen er udvalgt og de indledende tilladelser på plads blev området besigtiget for at detailplanlægge selve forsøgsstrækningen. Borup Renseanlæg ligger

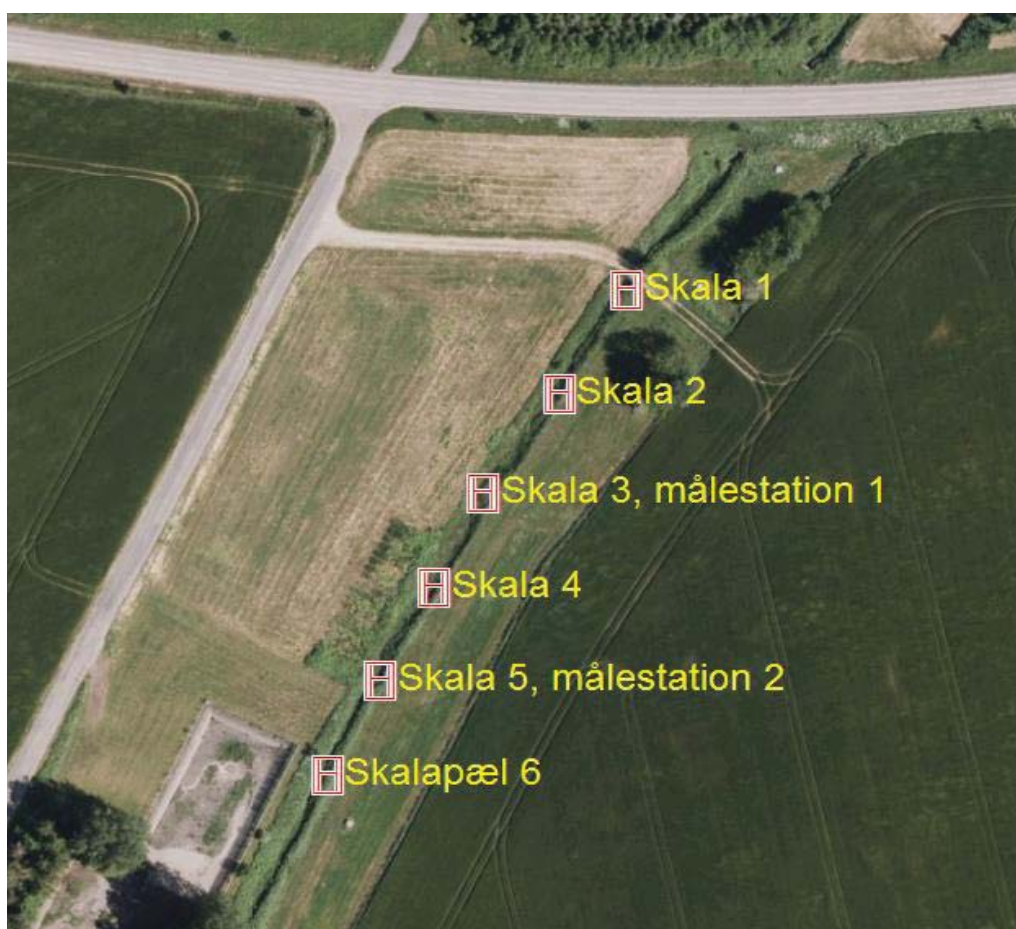
umiddelbart nedstrøms forsøgsstrækningen, og det var vigtigt at lægge forsøget opstrøms udløb fra renseanlæg og regnvandsbassiner, for at minimere omfanget og betydningen af tilledninger på selve forsøgsstrækningen.

Der blev lavet en aftale med renseanlægget om at de skulle holde udledningen konstant på selve forsøgssdagen, men da det regnede kraftigt op til selve forsøgssdagen var det desværre ikke praktisk muligt at holde denne forudsætning.

2.2. Opsætning af målestationer og skalapæle

Forud for forsøget blev der opsat 2 målestationer til registrering af vandstand på selve forsøgssdagen. Data fra Målestationen blev gjort tilgængelig via nettet – således at tilskuere kunne følge med i vandspejlsstigninger ved forsøgene via deres telefon og en medbragt pc. Målestationerne blev forud for forsøget endvidere brugt til at følge med i vandstanden, for at kunne finde en egnet forsøgssdag, hvor vandføringen ikke var for lav.

Der var en eksisterende skalapæl på forsøgsstrækningen Herudover blev der opsat 5 skalapæle (hvoraf de 2 blev opsat ved målestationerne) til manuel aflæsning af vandspejl på forsøgssdagen. Skalapælernes placering fremgår af Figur 4 og Tabel 1.



Figur 4 Placering af skalapæle på forsøgsstrækning.

Selve forsøgsstrækningen hvor indgrebene foretages er placeret fra st. 3525-3535 hvilket er mellem Skalapæl 5 og 6. Skalapæl 5 er placeret 5 meter opstrøms forsøgene, mens skalapæl 1-4 er placeret længere opstrøms forsøget for at kunne monitorere hvor langt op i vandløbet de enkelte scenarier har en effekt. Skalapæl 6 ligger nedstrøms forsøget og er opsat for at kunne monitorer om vandføringen ændres væsentligt i løbet af forsøgsdagen.

Station	Placering
3410	Skalapæl 1
3448	Skalapæl 2
3484	Skalapæl 3, målestation 1
3501	Skalapæl 4
3520	Skalapæl 5, målestation 2
3525 - 3535	Forsøgsstrækning
3542	Skalapæl 6

Tabel 1 Oversigt over placering af skalapæle, målestationer og forsøgsstrækning.

2.3. Opmåling af forsøgsstrækningen

Kimmerslev Møllebæk er kontrolopmålt i juli 2015. På selve forsøgsdagen er der lavet en detaljeret opmåling af den undersøgte vandløbsstrækning fra st. 3410-3542 idet der er målt tværprofiler ved alle skalapæle. Det vil sige at der er målt profiler med ca. 20 meters mellemrum nær forsøgsstrækningen og med ca. 40 meters mellemrum i den øvre del af den monitorerede strækning.

På selve forsøgsstrækningen er der målt tværprofiler i st. 3525, 3526, 3527, 3530 og 3535. I disse stationer blev der endvidere opsat landmålerstokke, således at gravføren kunne se, hvor der skulle lægges materiale ud i vandløbet.



Figur 5 Opmåling af forsøgsstrækning og opsætning af landmålerstokke.

2.4. Vandføringsmåling og aflæsning af skalapæle inden forsøg



Figur 6: Vandføring måles med vingeinstrument umiddelbart inden forsøget går i gang og vandspejl aflæses ved alle skalapæle.

I forbindelse med opmålingen af tværprofilerne blev toppen af de 6 skalaer indmålt. Umiddelbart inden forsøget måltes vandstanden ved alle 6 skalaer for at have et referencevandspejl og for at kunne foretage en Manningtalsbestemmelse på de enkelte delstrækninger (mellem skalpælene).

Umiddelbart inden selve forsøget blev der desuden lavet en vandføringsmåling på forsøgsstrækningen for at bestemme vandføringen på dagen. Efter forsøgene var afsluttet, blev der ligeledes lavet en vandføringsmåling. Vandføringen kl. 10.30 var 151 l/sek. Vandføringen kl. 15.30, efter forsøgene var afsluttet, blev målt til 148 l/sek, hvilket viser at vandføringen på dagen var rimelig konstant.

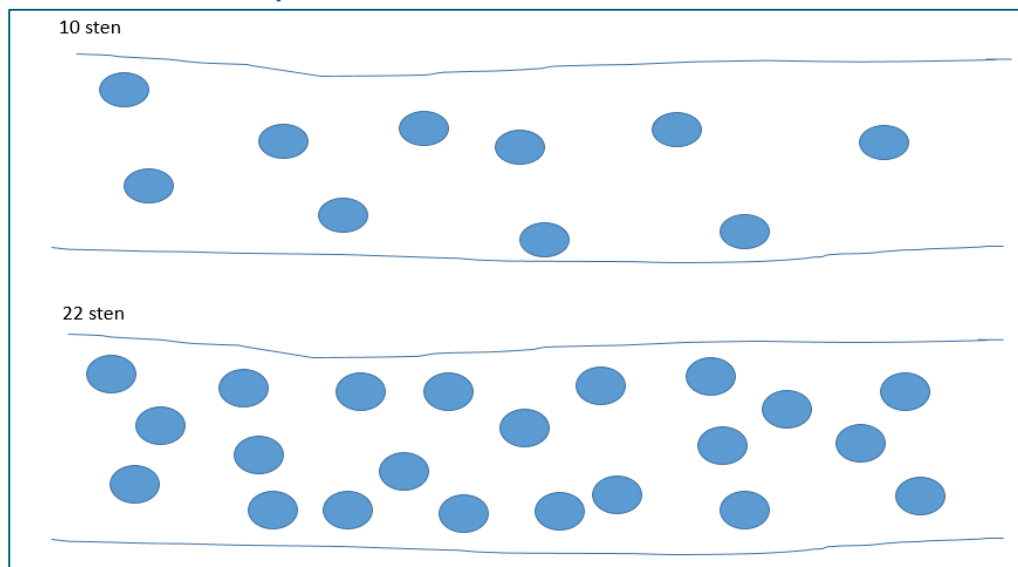


Figur 7. Velkomst og præsentation af dagens program.

3. FORSØGSOPSTILLINGER

I det følgende er de 4 forsøg beskrevet.

3.1. Store sten i vandløbsprofilen



Figur 8: Forsøgsopstilling 1, udlægning af store sten i profilet.

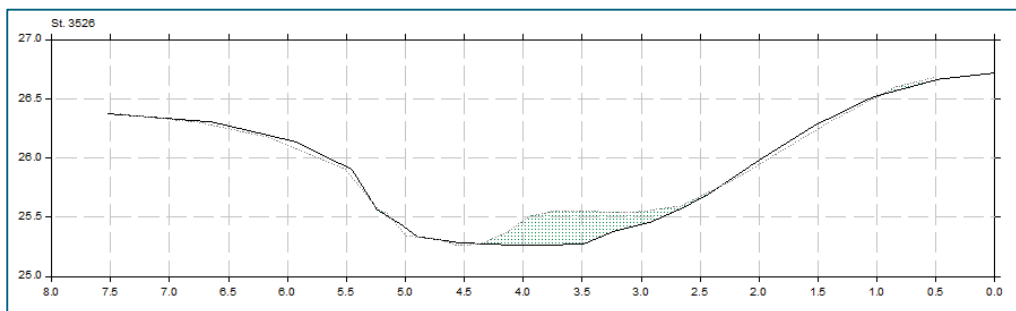
Ved det første forsøg blev der udlagt 10 store sten spredt i vandløbsprofilet på hele forsøgsstrækning st. 3525-3535. Det svarer til 1 sten pr løbende meter, stenstørrelsen var ca. 30-40 cm. Herefter øges antallet af sten til 22. Forsøgsopstillingen fremgår af principskitsen i Figur 8 og Figur 9. Der blev registreret vandstande både efter 10 og 22 sten. For at kunne nå så mange forsøgsopstillinger som muligt er denne forsøgsopstillingen ikke målt op. Stenene blev fjernet inden næste forsøg.



Figur 9: Forsøgsopstilling 1, store sten udlagt spredt på forsøgsstrækningen.

3.2. Indsnævring af vandløbsprofilen

For at undersøge effekten af en vandløbsindsnævring/brinknedskridning blev der i det næste forsøg udlagt grus i den ene side af vandløbet. Der blev udlagt grus i vandløbet, så det vandførende profil blev indsnævret til ca. halvdelen af det oprindelige profil, se Figur 10 og Figur 11. Det vandførende profil i st. 3526 har i forsøgsopstillingen et gennemstrømningsareal på 0,55 m², som blev reduceret til 0,28 m² ved forsøgsopstillingen.



Figur 10: Forsøgsopstilling 2, simulering af vandløbsindsnævring/brinknedskridning. Figuren viser det opmålte tværprofil før og efter udlægning af grus.

Ved det første forsøg var længden af indsnævringen 1 meter (fra st. 3525-3526). Profilindsnævringen blev opmålt, og der blev registreret vandstande ved alle 6 skalapæle. Herefter øgedes profilindsnævringen til 2 meter (st. 3525-3527), med efterfølgende opmåling og registrering af vandstande ved skalapæle. Herefter blev der opmålt og registrerede vandstande ved profilindsnævninger, der var 5 og 10 meter lange.



Figur 11: Profilindsnævringen øges gradvist fra 1 – 10 meter. Det indsnævrede profil opmåles, og der registreres vandstande ved de 6 skalapæle ved hver af de forskellige længder af profilindsnævringen.

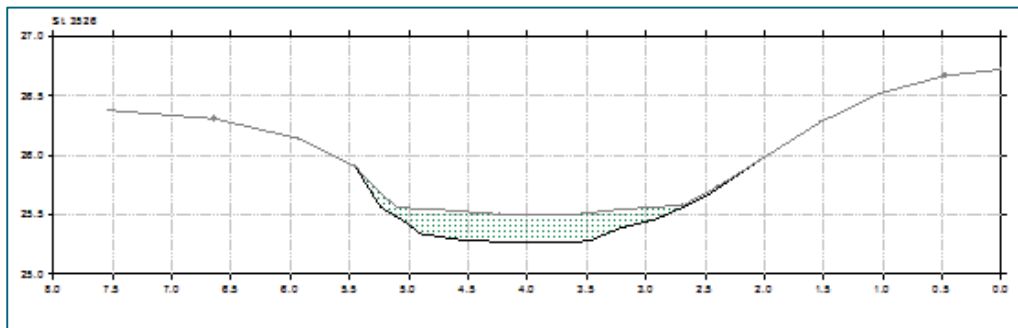
3.3. Bundhævning

I dette forsøg blev det udlagte grus jævnet ud over bunden i hele vandløbsprofilen for at simulere en generel bundhævning, der efter justering af mængden blev på ca. 17 cm i forhold til det oprindelige profil.

Som forsøgene med profilindsnævninger blev også dette forsøg udført med bundhævninger i forskellige længder. I det første forsøg var bundhævningen 10 meter lang (st. 3525-3535). Næste forsøgsopstilling var bundhævningen reduceret til 5 meter (St.

3525-3530) og til slut reduceret til 2 meter (St. 3525-3527). Principskitse af forsøgsopstillingen er vist i figur 12.

Figur 12



Figur 12: Forsøgsopstilling 3, simulering af bundhævning på ca. 17 cm. Figuren viser det opmålte tværprofil før og efter udlægning af grus.

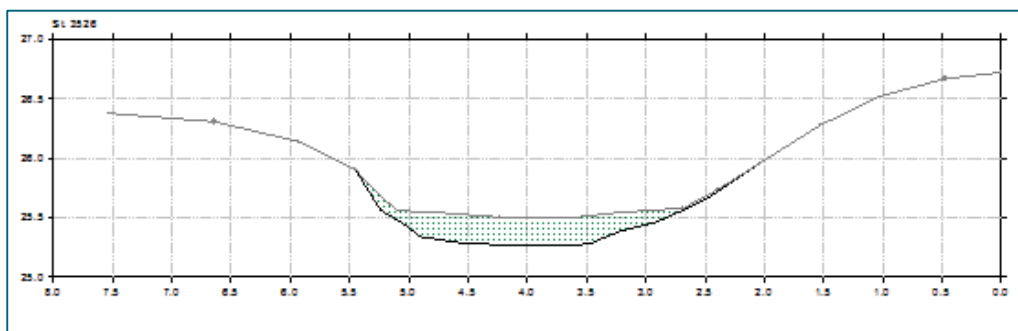
Forsøgsopstillingen blev opmålt ved hvert scenarie, og der blev registreret vandstande ved de 6 skalapæle.



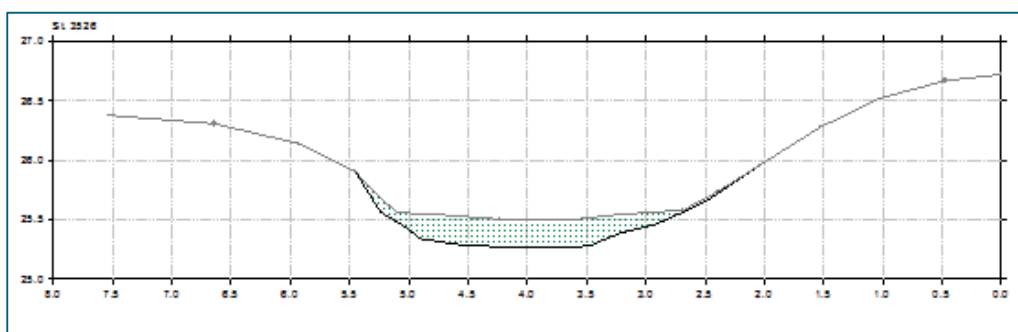
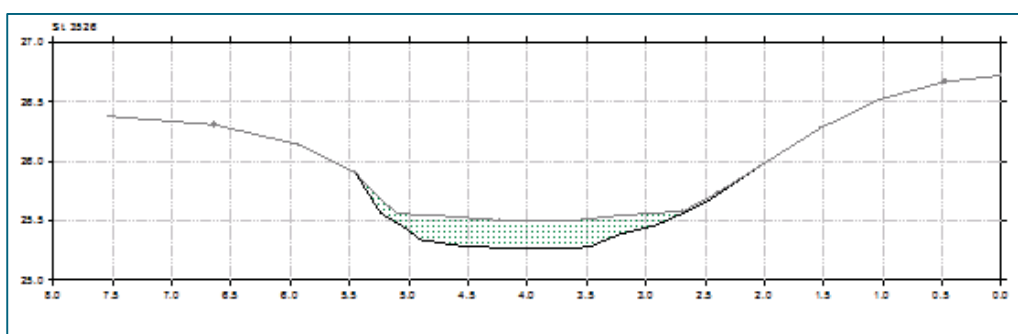
Figur 13: Bundhævning i 2, 5 og 10 meters længde. De nye profiler opmåles og der registreres vandstande ved de 6 skalapæle ved de forskellige længder af bundhævningen

3.4. Stryg

I det sidste forsøg blev der opbygget et stryg med en højde på ca. 23 cm over den oprindelig vandløbsbund. Forsøgsopstillingen fremgår af



Figur 14 og Figur 15.



Figur 14: Forsøgssopstilling 4, simulering af et strygs betydning for tilbagestuvning. Stryget er ca. 23 cm højere end den oprindelige vandløbs bund

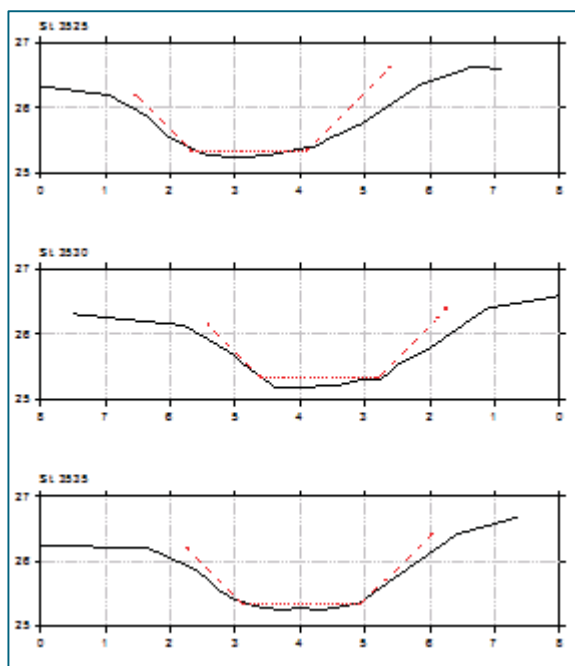
Forsøgssopsætningen blev opmålt, ligesom der blev registreret vandstande ved de 6 skalapæle.



Figur 15: Stryget er ved at blive opbygget. Der blev målt op og registreret vandstande.

3.5. Regulativkontrol

Efter forsøgets afslutning blev sten og grus gravet op, og vandløbet opmålt igen for at sikre, at regulativet var overholdt ved forsøgets afslutning. Resultaterne er regulativkontrollen er vist i figur 16.



Figur 16: Regulativkontrol – den røde stiplede linje er den teoretiske regulativmæssige skikkelse.

4. RESULTATER

4.1. Vandføringsmålinger og Manningtalsbestemmelse.

Vandføringen blev bestemt til 151 l/sek umiddelbart inden forsøget. Nogle timer efter forsøgets afslutning var vandføringen til 148 l/sek, hvilket indikerer, at vandføringen på forsøgsdagen var konstant- trods regn om morgenen. Ved alle forsøg blev skalapæl nr. 6 aflæst. Umiddelbart inden forsøget var aflæsning på skalapæl 6 en vandstand i kote 2151,9 cm DVR90. Nøjagtig samme vandspejlskote blev aflæst ved det næstsidste forsøg, som var bundhævning på 2 meter.

Den laveste registrerede vandstand ved skalapæl 6 var kote 2149,2 cm DVR90 ved det sidste forsøg med opbygning af stryget.

Den højeste vandstand ved skalapæl 6 var kote 2152,5 cm DVR90 i forsøget med 10 meter lang bundhævning. Dette forsøg blev lavet lige efter frokostpausen, og ved det efterfølgende forsøg med 5 meter lang bundhævning blev vandstandskoten aflæst til 2151,4 cm DVR90. Ved det efterfølgende forsøg blev vandstanden som nævnt aflæst til kote 2151,9 cm DVR90 som ved forsøgets start. Nedstrøms forsøget findes et rørudløb med regnvand fra Borup, ligesom der var en stor udledning fra renseanlægget længere nedstrøms. Forskellene i aflæsningerne på skalapæl 6 ses først og fremmest som et udtryk for måleusikkerhed, ligesom regn- og spildevandsudledninger kan have givet en påvirkning af skalapæl 6.

Samtidig med vandføringsmålingen blev vandstanden ved alle skalapæle aflæst.

Aflæsningerne fremgår af Tabel 2.

Skalapæl nr.	Vandløbsstation	Afstand opstrøms start af forsøg	Vandspejlskote cm DVR90
1	3410	115	2584,9
2	3448	78	2576,7
3	3484	41	2567,0
4	3501	25	2561,4
5	3520	5	2557,8
6	3542	-17	2551,9

Tabel 2: Aflæsning af vandstande på skalapæle forud for forsøgets gennemførelse.

Ved hjælp af Orbicons vandspejlsberegningsprogram VASP er der foretaget en Manningtalsbestemmelse for hele forsøgsstrækningen.

Ved Manningtalsbestemmelsen er der anvendt den målte vandføring på 151 l/sek i st. 3484 samt de observerede vandstande på de 6 skalapæle.

Resultatet af Manningtalsbestemmelsen fremgår af Tabel 3.

Strækning	Manningtal
3410-3448	19,0
3448-3484	10,8
3484-3501	8,0
3501-3520	11,9
3520-3542	13,6

Tabel 3: Resultatet af Manningtalsbestemmelsen inden forsøget

Det ses af ovenstående tabel, at Manningtallet var relativt lavt for årstiden på delstrækninger. Det vurderes at skyldes, at der var ganske meget grøde i vandløbet, sandsynligvis som følge af, at november var varmere end normalt.



Figur 17: Der blev observeret en del grøde, særligt vandstjerne, på forsøgsstrækningen.

4.2. Forsøg 1: udlægning af store sten

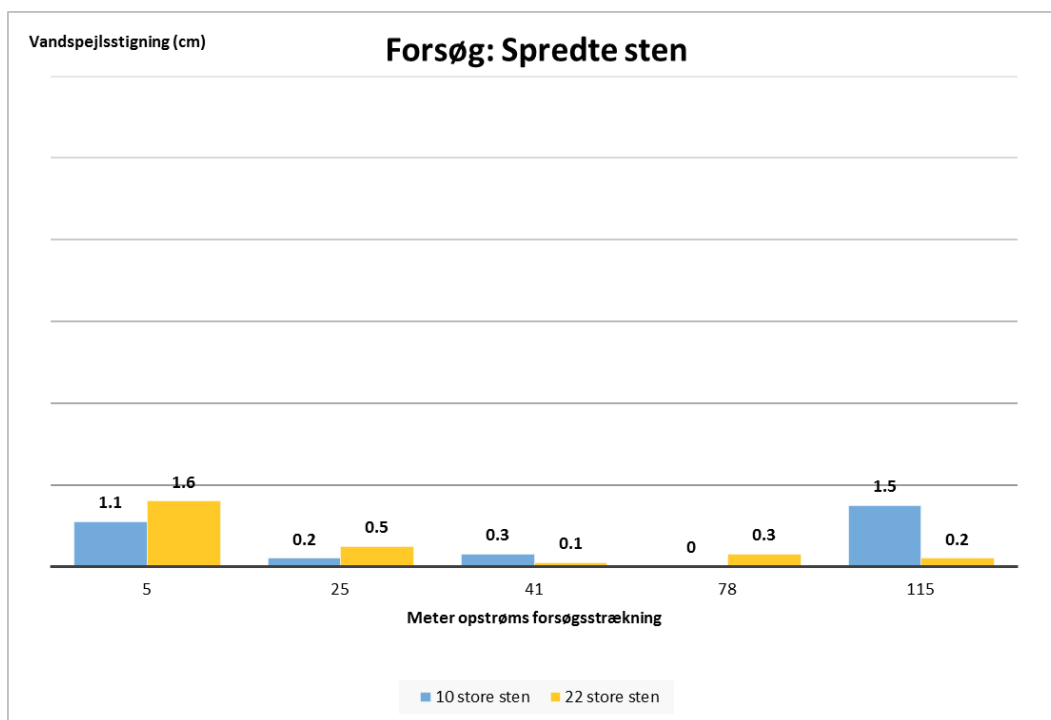
Ved det første forsøg blev der udlagt først 10 sten i vandløbet, og herefter yderligere 12 sten.

Som det fremgår af Figur 8 og Figur 9 resulterede udlægningerne i relativt stor tæthed af sten i vandløbsprofilet, særligt ved forsøget med 22 sten fordelt på 10 meter.

Skalapælene blev aflæst kort efter udlægningen af stenene, og de registrerede vandspejlsstigninger ved de opstrøms beliggende skalapæle fremgår af Figur 18.

Udlægning af 10 sten gav en vandspejlsstigning på 1,1 cm 5 meter opstrøms forsøgsstrækningen. 25 meter opstrøms var vandspejlsstigningen på 0,2 cm. Længere opstrøms (41 meter og 115 meter) var vandstanden steget endnu mindre, mens der 78 meter opstrøms forsøgsstrækningen ikke blev registreret nogen vandspejlsstigning. Da effekten af at udlægge 10 sten var så forholdsvis lille, er de målte ændringer længere opstrøms end 25 m at betragte som måleusikkerheder.

Ved udlægning af i alt 22 sten blev der registreret en vandspejlsstigning på 1,6 cm 5 meter opstrøms forsøget, aftagende til henholdsvis 0,5 og 0,1 cm 25 og 41 meter opstrøms forsøget. En ubetydelig vandspejlsstigning 78 meter opstrøms anses som udtryk for måleusikkerhed. En lidt større stigning 115 meter opstrøms forsøget vurderes at hænge sammen med en svagt fluktuerende vandstand som følge af turbulens umiddelbart nedstrøms en bro.



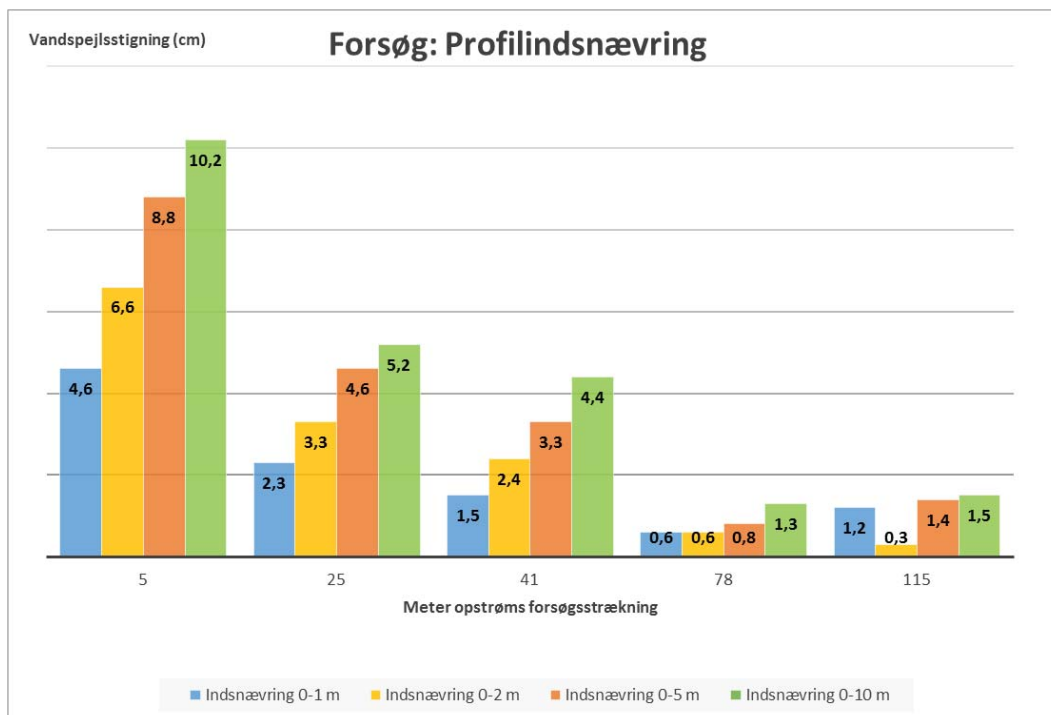
Figur 18: Observerede vandspejlsstigninger ved skalapælene opstrøms forsøgsstrækningen efter udlægning af 10 og 22 sten på forsøgsstrækningen.

4.3. Forsøg 2: profilindsnævring

Forsøget med profilindsnævring blev udført i 4 scenarier, hvor indsnævring af vandløbsprofilen til halv størrelse blev lavet i følgende længder: 1, 2, 5 og 10 meter.

De observerede vandspejlsstigninger ved de opstrøms skalapæle fremgår af Figur 19. Forsøget viser at der sker en vandspejlsstigning når det vandførende vandløbsprofil indsnævres til det halve og at længden af indsnævringen har en betydning for størrelsen af vandspejlsstigningen. Jo længere indsnævringen er jo højere vandspejlsstigning.

Med en indsnævring af 1 meters længde registreres der en vandspejlsstigning på 4,6 cm 5 meter opstrøms forsøgsstrækningen. Når længden af indsnævringen blev øget til 2, 5 og 10 meter er vandspejlsstigningen 5 meter opstrøms henholdsvis 6,6, 8,8 og 10,2 cm. Den vandspejlsstigning der kommer af at øge længden af indsnævringen er altså aftagende.



Figur 19: Målte vandspejlsstigninger ved skalapæle opstrøms forsøgsstrækningen efter indsnævring af profillet til ca. halvdelen af det vandførende profil. Indsnævringen blev udført med en længde på henholdsvis 1, 2, 5 og 10 meter.

25 meter opstrøms forsøgsstrækningen begynder effekten af indsnævringen at aftage. De observerede vandspejlsstigninger er her fra 2,3 cm for indsnævringen på 1 meter og 5,2 cm for indsnævringen på 10 meter. 78 meter opstrøms forsøget er vandspejlstigningen kun 0,6 cm og 1,3 cm.

Det er valgt at se bort fra registreringerne ved skalapælen 115 meter opstrøms forsøget (Figur 20). Skalapælen står ved udløbet fra en bro hvor der inde i broen er et styrt.

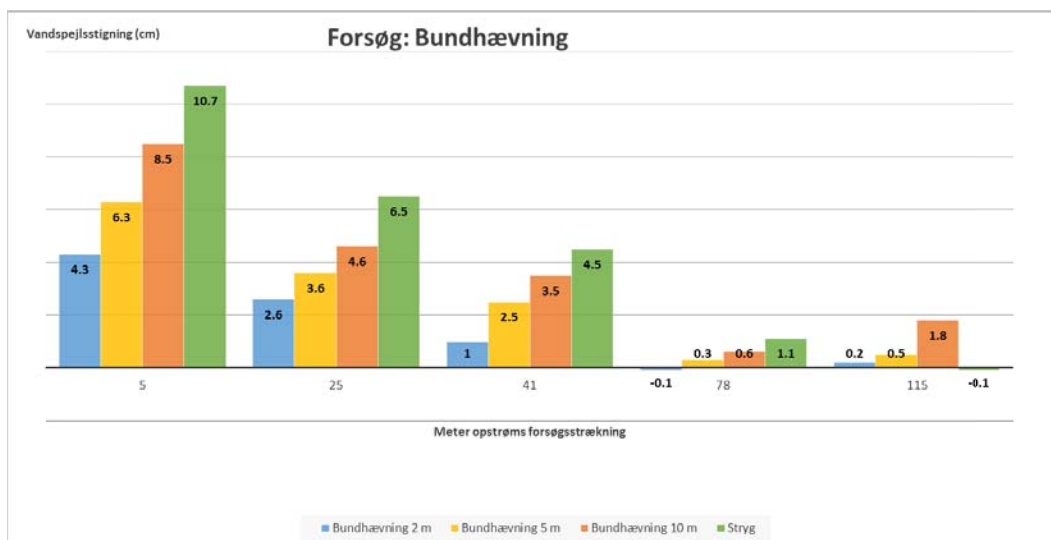
På forsøgsdagen blev der ved skalaaflysningerne observeret meget varierende strømforhold lige ved broudløbet og vandstanden blev ved flere lejligheder kontrolleret flere gange med under et minuts mellemrum med meget forskellige resultater. De observerede vandstande vurderes derfor at være et udtryk for strømforholdene lige ved broudløbet og ikke et udtryk for effekter af forsøgsopstillingerne.



Figur 20: Ved Skalapæl 1, 115 meter opstrøms forsøget var der meget varierende strømforhold omkring skalapælen, og aflæsningerne af denne skala skønnes mere at være et udtryk for strømforhold end for påvirkninger af forsøget.

4.4. Forsøg 3 og 4 - bundhævning og stryg

Forsøget med bundhævning blev udført i 3 scenarier, hvor bundhævningen af vandløbsprofilen på ca. 17 cm blev lavet i følgende længder: 2, 5 og 10 meter. Det sidste forsøg i denne forsøgsrække var opbygning af et stryg af ca. 1 meters længde med en højde på ca. 23 cm.



Figur 21: Observerede vandspejlsstigninger ved skalapæle opstrøms forsøgsstrækningen efter bundhævning af henholdsvis 2, 5 og 10 meters længde samt ved opbygning af stryg.

De observerede vandspejlsstigninger ved de opstrøms skalapæle fremgår af Figur 21. Forsøget viste ligesom det foregående forsøg, at der sker en vandspejlsstigning, når bunden hæves i vandløbsprofilen, og at længden af strækningen med bundhævning har betydning for størrelsen af vandspejlsstigningen på den opstrøms strækning, samt at vandspejlsstigningen stiger med stigende længde af bundhævningen.

Med en bundhævning på 2 meters længde blev der registreret der en vandspejlsstigning på 4,3 cm 5 meter opstrøms forsøgsstrækningen. Da længden af bundhævningen blev øget til 5 og 10 meter var vandspejlsstigningen 5 meter opstrøms forsøget henholdsvis 6,3 og 8,5 cm. Ved opbygningen af stryget, der var ca. 1 meter langt men 6 cm højere end bundhævningen, blev der registreret en vandspejlsstigning på 10,7 cm 5 meter opstrøms stryget.

Som ved forsøget med indsnævninger aftager de registrerede vandspejlsstigninger ved bundhævningerne til under 1 cm 78 meter opstrøms forsøget, ved stryget dog til en vandspejlsstigning på 1,1 cm.

4.5. Konklusion og bemærkninger til feltforsøg

Alle forsøg blev gennemført med det formål at skabe vandspejlsstigninger, der var tilstrækkeligt store til at ligge ud over almindelige måleusikkerheder.

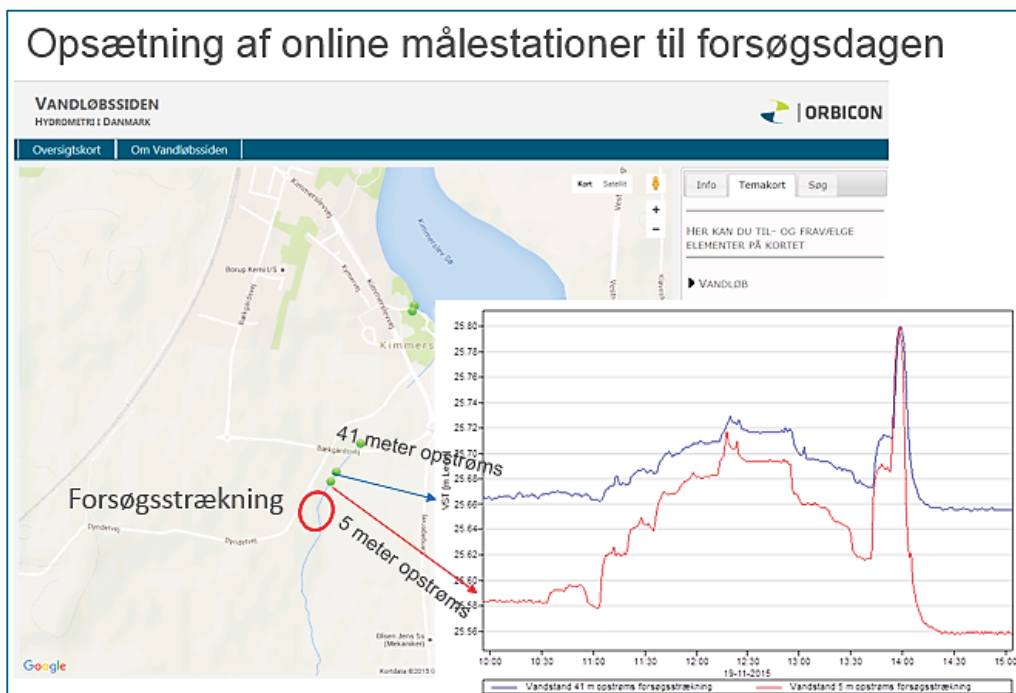
Forsøgene viser, at foruden størrelsen (bredden henholdsvis højden) af profilindsnævninger og bundhævninger, så har også længden af indgrebene betydning for de vandspejlsmæssige konsekvenser.

Som forventet aftog effekterne af indgrebene, jo længere opstrøms man kommer for forsøgsstrækningen. Hvor langt op der kan registreres en effekt, afhænger af vandløbs faldforhold. Jo mindre fald der er på vandløbet, desto længere opstrøms indgrebet vil konsekvenserne kunne registreres, og omvendt.

Forud for forsøgsdagen opstillede Orbicon 2 målestationer, der kunne registrere vandstanden løbende henholdsvis 5 og 41 meter opstrøms forsøgsstrækningen.

På selve dagen kunne man via Orbicons hjemmeside "Hydrometri.dk" tilgå de 2 online-stationer og følge med i vandstandsændringerne i de forskellige forsøg, se Figur 22. Det skal bemærkes, at målestationerne blev sat op i anledning af forsøget og herefter nedtaget. De fremgår derfor ikke længere på "Hydrometri.dk", men data er lagret i Orbicons hydrometridatabase HYMER.

På plottene over vandstand kan man se effekten af, at der ca. kl. 10.30 blev lagt 10 sten i vandet. Ca. 10.45 blev der lagt yderligere 12 sten ud på forsøgsstrækningen. Lige før kl. 11 optages stenene af vandløbet. Herefter opbygges først en profilindsnævring på 1 meter, som efterfølgende øges til 2, 5 og 10 meters længde. Profilindsnævringen på 10 meters længde etableres ca. kl. 12, hvor der registreres en vandstand 5 meter opstrøms forsøget i ca. kote 25.68 m DVR90. Herefter blev grusmaterialet fordelt udover hele bunden af den 10 meter forsøgsstrækning og der holdes frokost for deltagerne.



Figur 22: Forud for forsøget blev der opsat 2 online målestationer, der registrerede vandstanden løbende på forsøgsdagen.

Kl. ca. 12.50 går forsøget i gang igen, men det besluttes at bortgrave noget af gruset, da bundhævningen var blevet højere end planlagt. Kl. 13 er bundhævningen ca. 17 cm over den oprindelige vandløbsbund, og der registreres en vandstand 5 meter opstrøms forsøget i ca. kote 25.66 m DVR90, som falder til henholdsvis kote 25.64 m og 25.62 i forbindelse med at materialet afgraves til længder på 5 meter og 2 meter.

Afslutningsvis opbygges stryget på ca. 23 cm over den oprindelige bund, og der registreres en vandstand på ca. 2568,5 m DVR90 5 meter opstrøms. Kl. 14, ved afslutningen af forsøget, blev der som et ekstra forsøg opbygget en decideret dæmning i vandløbet. Den blev dog kort tid efter gennembrudt og borteroderet af vandet på grund af stor vandhastighed. Herefter blev alt udlagt materiale gravet op af vandløbet, således at forsøgsstrækningen kunne afleveres i regulativmæssig tilstand.



Figur 23: Som afslutning på forsøgsdagen blev der opbygget en dæmning.

5. PRAKTISKE FORSØG OG BEREKNINGER

Udover at måle de faktiske vandspejlsstigninger ved forsøg med profilændringer, er et af hovedformålene med det praktiske forsøg at tilvejebringe et datagrundlag for at kunne sammenligne målte vandstande med de vandstande, der kan beregnes ud fra opmålingerne af ændringerne og de målte vandføringer.

Som tidligere beskrevet blev vandløbet opmålt inden forsøgene, ligesom de enkelte forsøgsopstillinger blev opmålt løbende. De opmålte data blev efterfølgende overført til Orbicons Vandspejlsberegningsprogram VASP.

Der er således for hver forsøgsopstilling lavet et længdeprofil, der kan bruges til at beregne vandspejlsændringerne i de enkelte forsøg. Det giver mulighed for at kunne sammenligne de beregnede vandstande med de målte vandstande.

Ved alle beregninger for forsøgene er der regnet med en vandføring på 150 l/sek, hvilket er 1 l/sek lavere end lige umiddelbart inden forsøget, idet vandføringen et par timer efter forsøget blev målt til 148 l/sek. Der er ved alle forsøgene regnet med de Manningtal for delstrækningerne, som blev bestemt ved forsøgsdagens begyndelse, se Tabel 3.

5.1. Profilindsnævninger

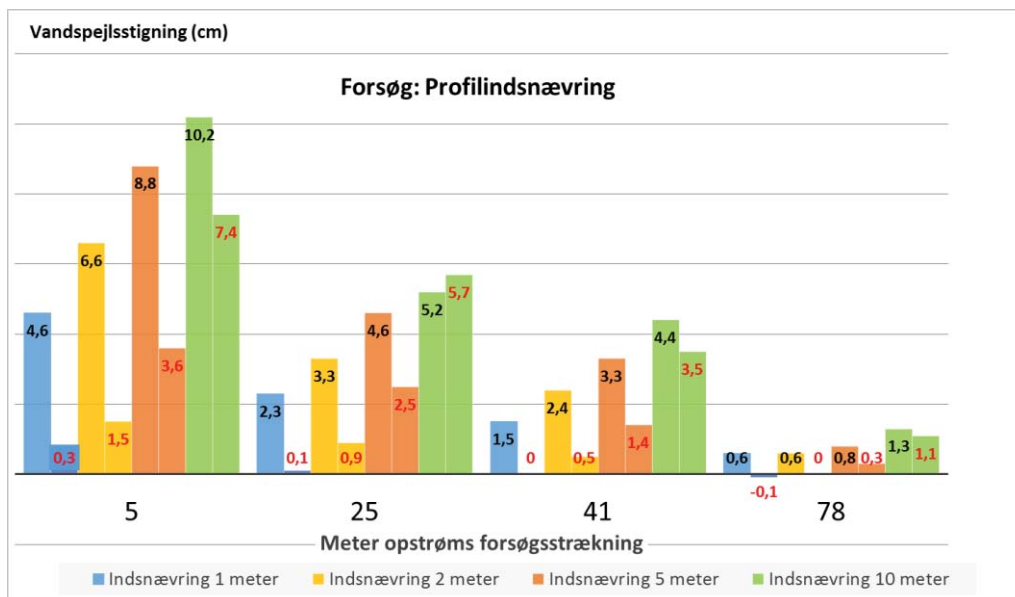
Beregnete og målte vandspejl for alle forsøg med profilindsnævninger fremgår af længdeprofilet i bilag 1. Af bilag 1a, 1b 1c og 1d fremgår de enkelte forsøg hver for sig.

Et samlet overblik over forskellene i observerede og beregnede konsekvenser af de 4 forsøg med profilindsnævring fremgår af Figur 24.

Som det ses af længdeprofilene, er der ved målestationen 5 meter opstrøms forsøget en lille forskel i observerede og beregnede vandspejl. Forskellen aftager jo længere opstrøms forsøgsstrækningen man kommer.

Herudover er der en tendens til, at når profilindsnævringen når op på 10 meter, bliver forskellen på beregnet og målt vandspejl mindre.

78 meter opstrøms forsøgsstrækningen er forskellen på målte og beregnede vandspejl i alle tilfælde mindre end 1 cm, mens de 41 meter opstrøms forsøget er tæt på 2 cm forskel.



Figur 24: Målte og beregnede vandspejlsstigninger ved forsøgene med profilindsnævninger. Søjlerne med de sorte tal er målte vandspejlsstigninger, og søjlerne med røde tal er beregnede vandspejlsstigninger.

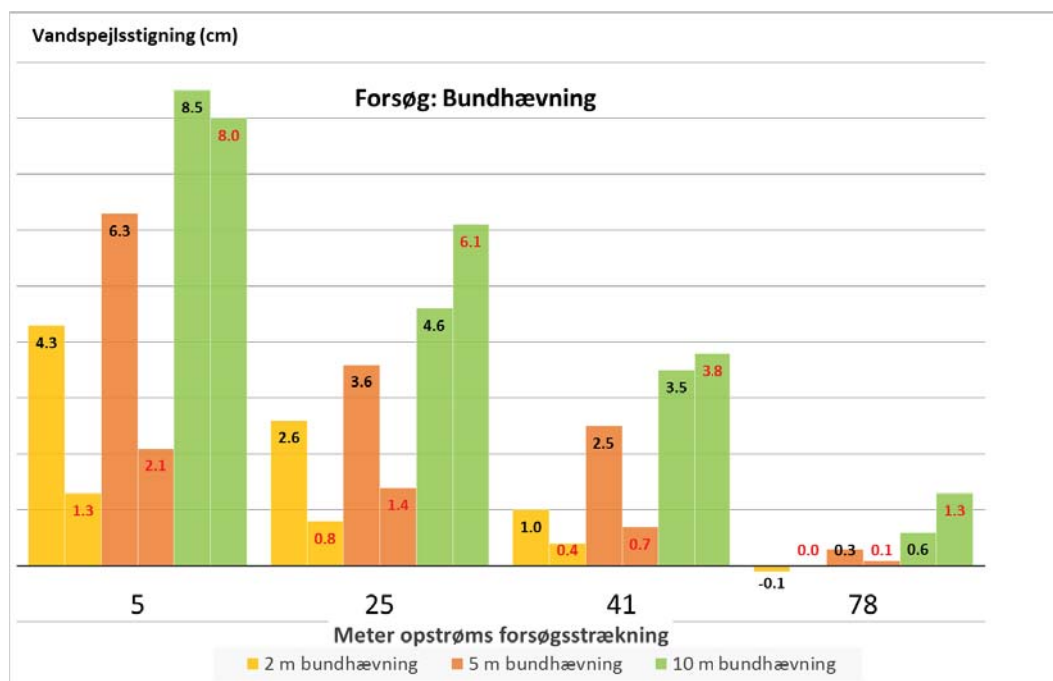
5.2. Bundhævninger og stryg

Beregnete og målte observerede vandspejl for alle forsøg med bundhævninger fremgår af længdeprofilet i bilag 2. Af bilag 2a, 2b, 2c og 2d fremgår resultaterne af de enkelte forsøg hver for sig.

Som det ses af længdeprofilerne, er der ved målestationen 5 meter opstrøms forsøget en lille forskel mellem målte og beregnede vandspejl. Forskellen er mindre end i forsøgene med profilindsnævninger, og aftager ligeledes i opstrøms retning fra forsøgsstrækningen man kommer.

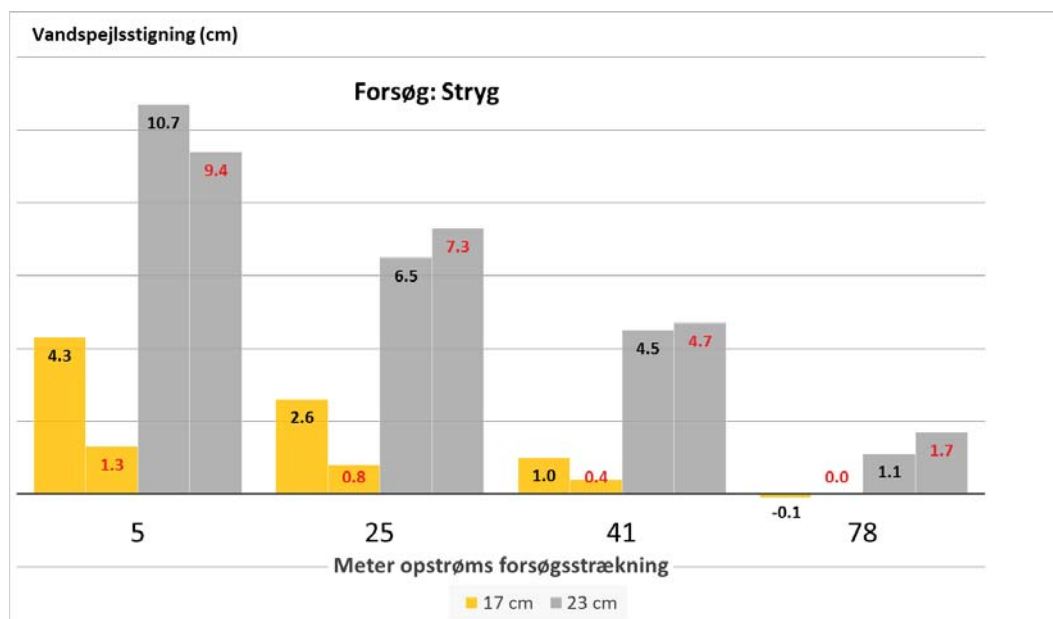
Et samlet overblik over forskellene i observerede og beregnede konsekvenser af de forsøgene med bundhævninger fremgår af Figur 25 og Figur 26.

Ved forsøgene med 10 meter lang bundhævning er forskellen på den beregnede vandspejlsstigning og den målte vandspejlsstigning på 0,5 cm. 25 meter opstrøms er det beregnede vandspejl højere end det målte, mens forskellen 41 meter opstrøms er 0,3 cm.



Figur 25. Målte og beregnede vandspejlsstigninger ved forsøgene med bundhævninger. Søjlerne med de sorte tal er målte vandspejlsstigninger, og søjler med røde tal er beregnede vandspejlsstigninger.

Når man sammenholder de to forsøg med bundhævninger på 2 meters længde ses det, at vandspejlsstigningerne er relativt større ved den store bundhævning på 23 cm, men at forskellen på beregnet og observeret vandspejl er mindst.



Figur 26: Målte og beregnede vandspejlsstigninger ved forsøgene med korte bundhævninger på henholdsvis 17 og 23 cm (stryg). Søjlerne med de sorte tal er målte vandspejlsstigninger, og søjler med røde tal er beregnede vandspejlsstigninger.

5.3. Sammenligning af Stationære beregninger i MIKE 11 og VASP

Ud over beregningerne i VASP er der foretaget de samme stationære beregninger i MIKE 11. Disse beregninger viser, at brugen af VASP og MIKE 11 som beregningsværktøjer giver samme resultater.

5.4. Konklusion

Som det fremgår af 5.1 og 5.2 er der konstateret forskelle mellem de målte og de beregnede vandspejlsstigninger i de enkelte forsøg.

Det viser sig, at jo længere profilindsnævring og en bundhævning er, desto mindre er forskellen mellem de målte og det beregnede vandspejl. Ligeledes er tendensen, at jo højere stryg der opbygges, desto mindre er forskellen mellem målte og beregnede vandspejl.

Beregningerne vurderes på den baggrund at være bedst til at angive, hvor langt opstrøms et givet indgreb har effekt, mens de er mindre gode til at beskrive vandstandsændringerne umiddelbart opstrøms indgrebet.

En af årsagerne til forskellen mellem målte og beregnede vandspejl er, at VASP (og MIKE11) ikke regner på enkelttab på åbne strækninger.

Jo kortere indsnævringen eller bundhævningen er, desto større er den forskel i vandhastighed, som indgrebet skaber i forhold til strækningerne op- og nedstrøms forsøget.

Det betyder, at der vil være et betydende enkelttab, som ikke indgår i beregningerne. Jo længere indgrebet er, desto lavere vil vandhastigheden være hen over indgrebet, hvilket betyder mindre hastighedsforskel mellem op- og nedstrøms strækninger, hvorfor enkelttabet vil være mindre. Hertil kommer, at der både er et indløbs- og et udløbstab. Jo længere strækningen med indgreb er, desto mindre vil udløbstabet slå igennem opstrøms indgrebet. I forsøget med profilindsnævninger vil hastighedsforskellen være større end i forsøgene med bundhævninger. Dette medfører et relativt større enkelttab ved profilindsnævningerne, og dermed en større forskel mellem målte og beregnede vandspejl. Disse betragtninger bekræftes af forsøgs- og beregningsresultaterne.

Feltforsøgene og beregningerne viser således, at der ved visse typer af indgreb i vandløb forekommer hydrauliske fænomener (enkelttab), som ikke tages i regning ved vandspejlsberegninger med de eksisterende beregningsværktøjer.

En anden medvirkende årsag til forskellene mellem målte og beregnede vandspejlsstigninger er, at Manningtallet på forsøgsstrækningen ændrer sig som følge af udlægningen af det ru materiale – grus og sten. Der er i de gennemførte beregninger ikke ændret på Manningtallet på forsøgsstrækningen.

Ved projektering af stryg vil der almindeligvis i beregningerne blive indlagt den ændring af Manningtallet, som stryg skønnes at medføre i forhold til udgangspunktet.

Kimmerslev Møllebæk



Feltforsøg 19. nov. 2015, bilag 1

Lyserrøde krydser = Profiliindsnævring 0-10 meter

Turkis krydser = Profiliindsnævring 0-5 meter

Blå krydser = Profiliindsnævring 0-2 meter

Grønne krydser = Profiliindsnævring 0-1 meter

Røde krydser = Reference inden forsøg

Indsnævring: ca. 0-10 meter

Indsnævring: ca. 0-5 meter

Indsnævring: ca. 0-2 meter

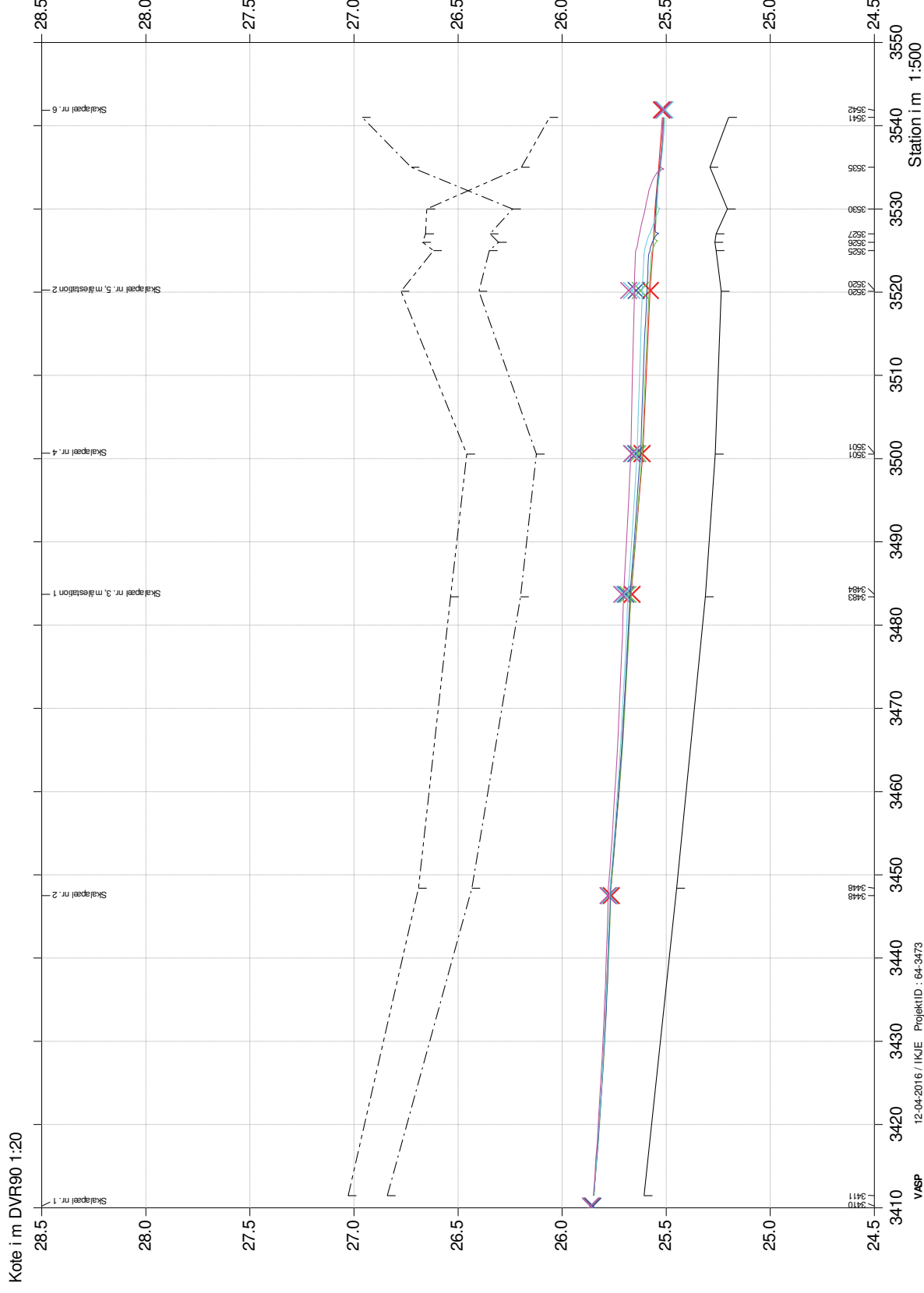
Indsnævring: ca. 0-1 meter

Opmåling, reference

Terraæn Højre

Terraæn venstre

Bund



Kimmerslev Møllebæk

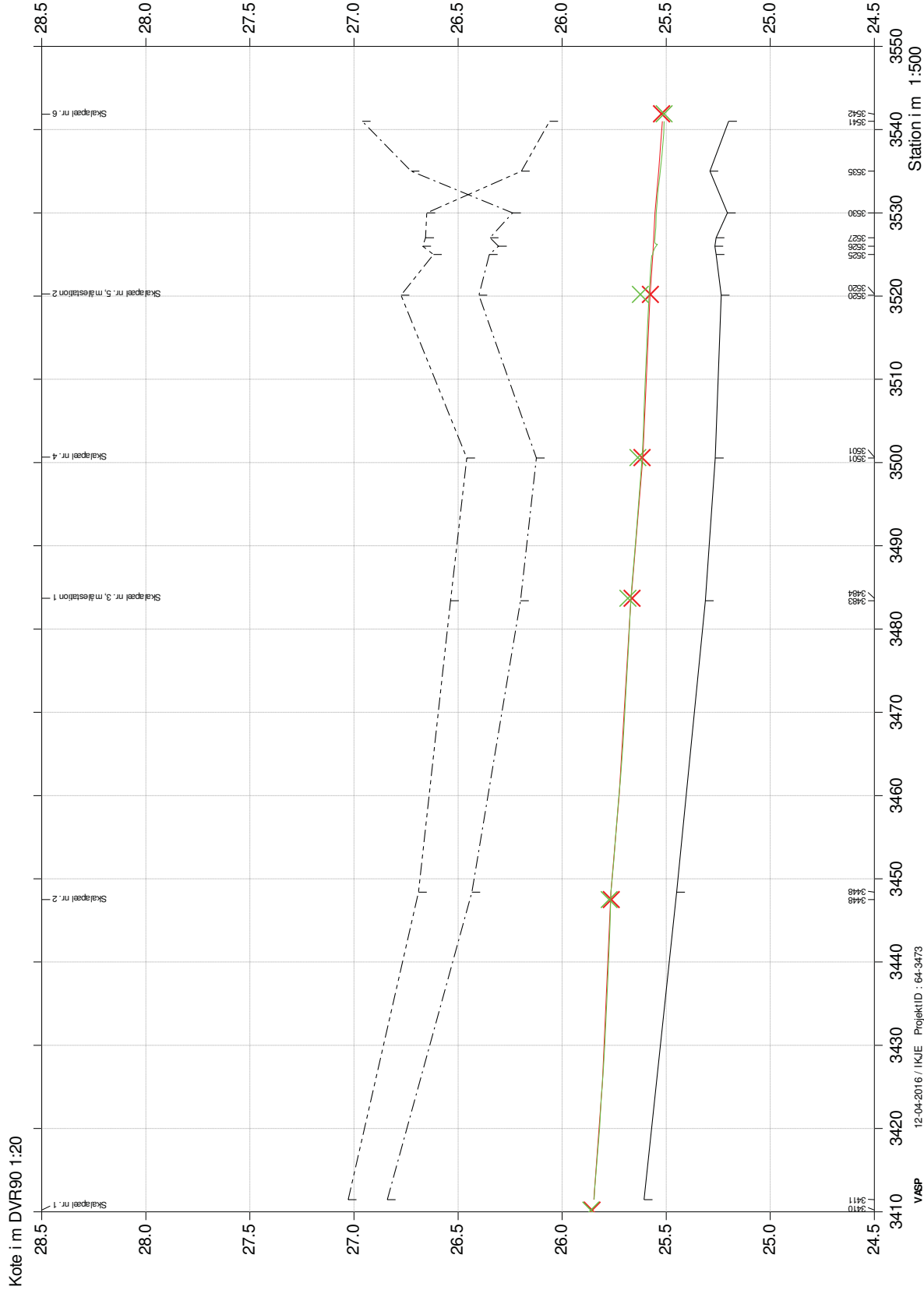


Feltforsøg 19. nov. 2015, bilag 1a

Grønne krydser = Profilindsnævring 0-1 meter
Røde krydser = Reference inden forsøg

- Opmåling, reference
- - - - - Terraen Højre
- . - . - - Terraen venstre
- Bund

Indsnævring: ca. 0-1 meter



Kimmerslev Møllebæk

Blå krydser = Profilindsnævring 0-2 meter

Røde krydser = Reference inden forsøg

— Opmåling, reference

- - - - - Terraen Højre

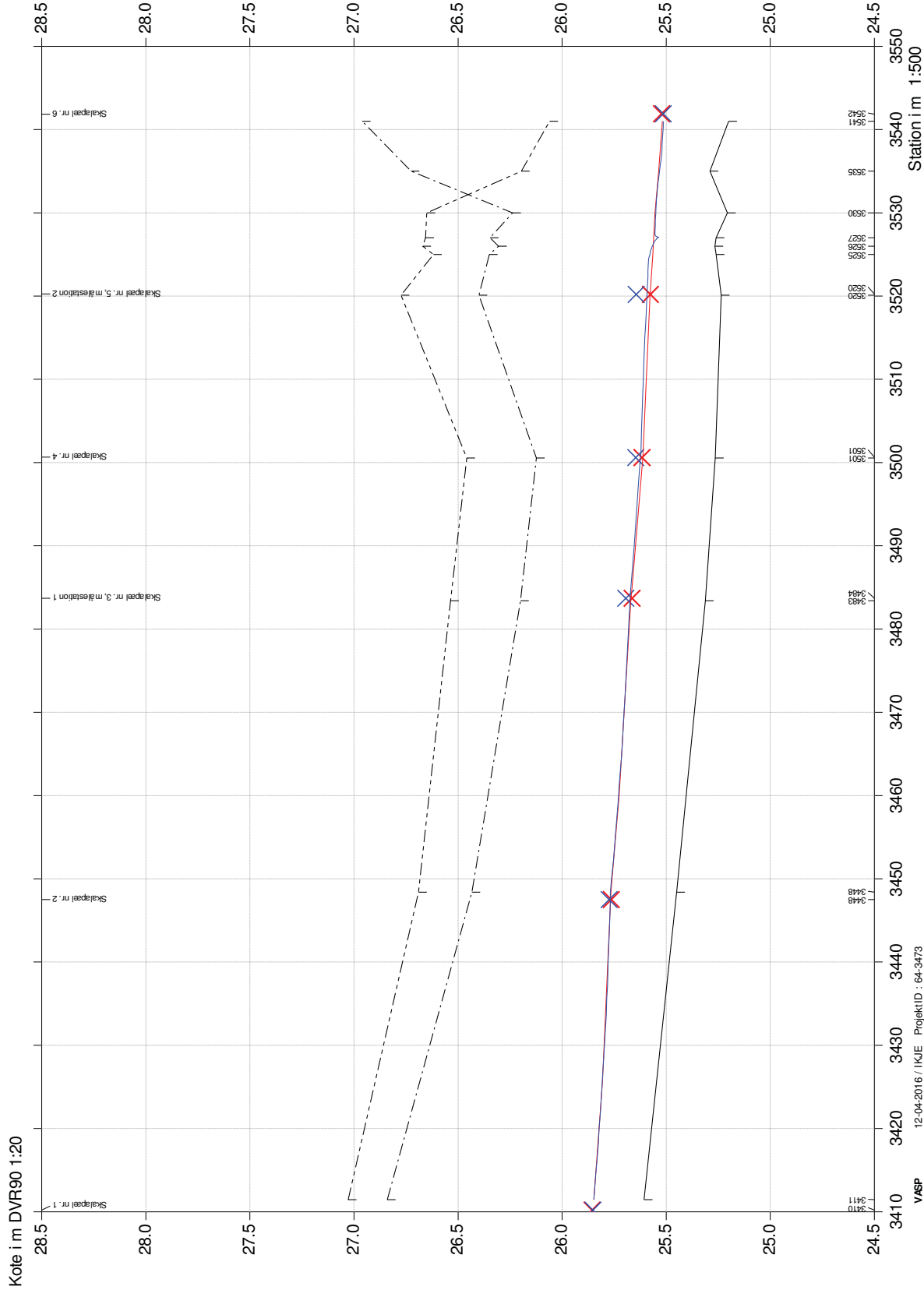
- . - . - Terraen venstre

— Bund

— Indsnævring: ca. 0-2 meter



Feltforsøg 19. nov. 2015, bilag 1b



Kimmerslev Møllebæk

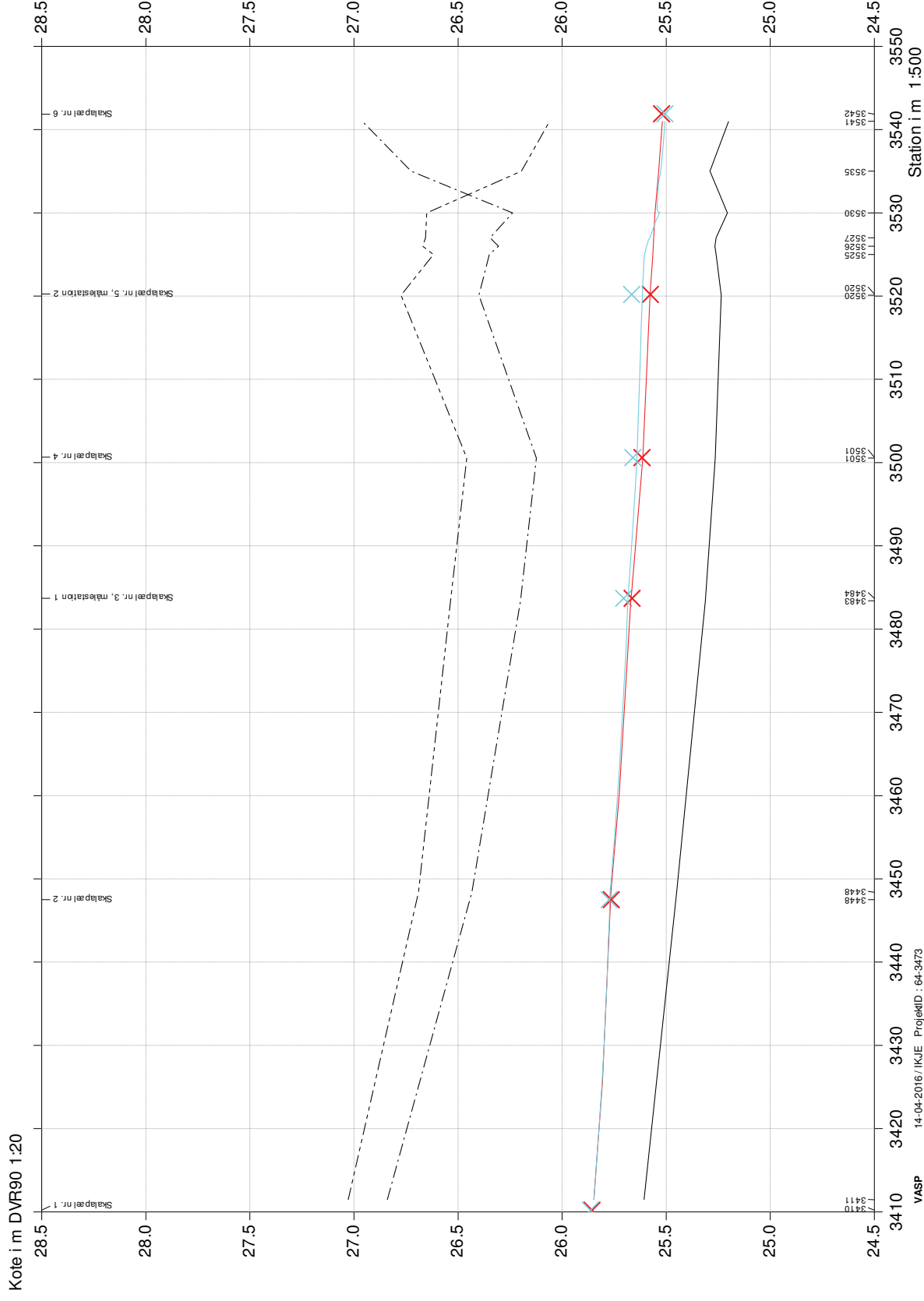


Feltforsøg 19. nov. 2015, bilag 1c

Turkis krydser = Profilindsnævring 0-5 meter
Røde krydser = Reference inden forsøg

- Opmåling, reference
- - - - - Terræn Højre
- . - . - - Terræn venstre
- Bund

— Indsnævring: ca. 0-5 meter



Kimmerslev Møllebæk



Lyserøde krydser = Profillindsnævring 0-10 meter

Røde krydser = Reference inden forsøg

— Opmåling, reference

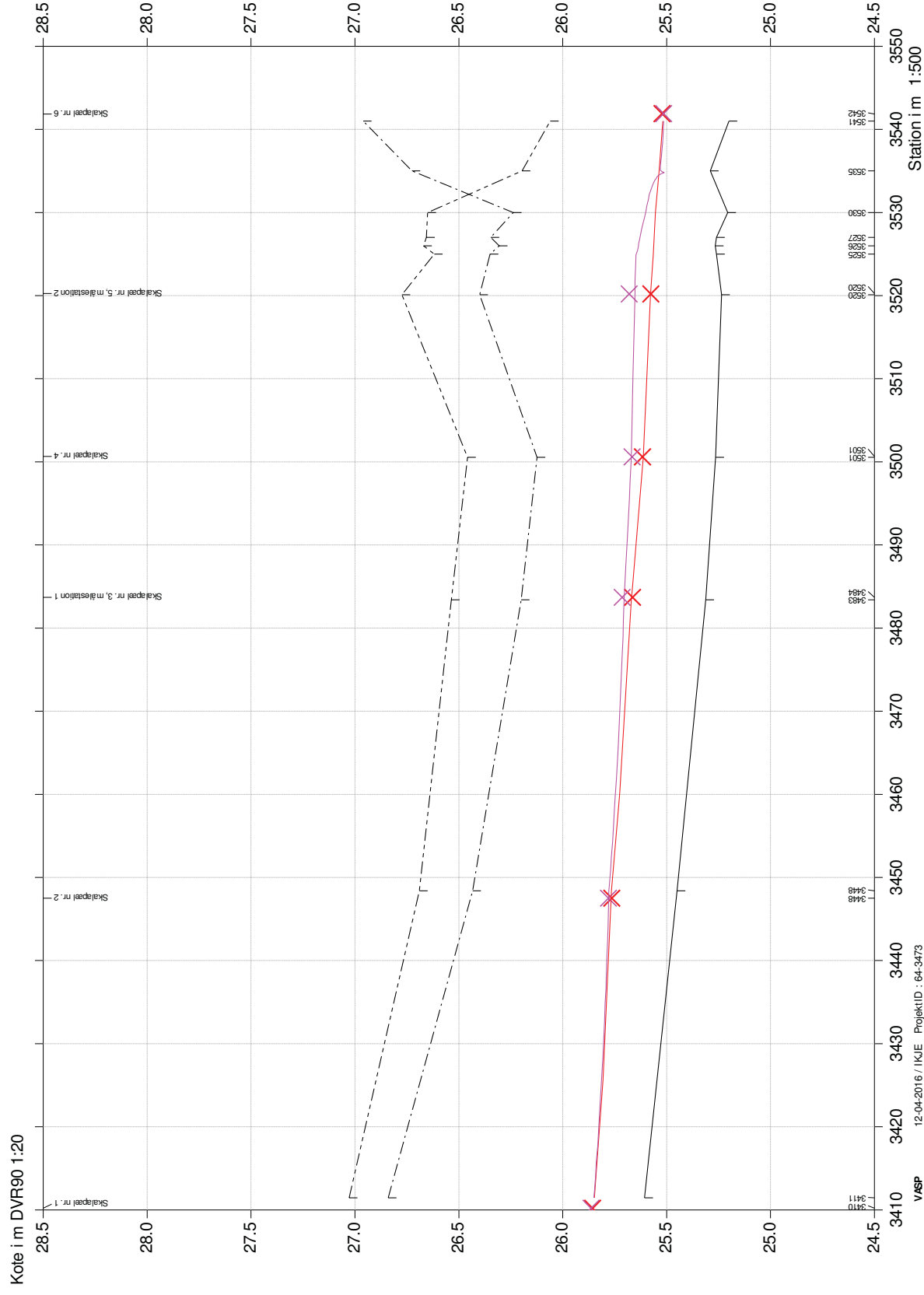
- - - - - Terraæn Højre

- . - . - Terraæn venstre

— Bund

— Indsnævring: ca. 0-10 meter

Feltforsøg 19. nov. 2015, bilag 1d



Kimmerslev Møllebæk



Feltforsøg 19. nov. 2015 Bilag 2

Lyserrøde krydser = Stryg ca. 20 cm højde i 0-2 meter

Turkis krydser = Bundhævning 0-10 meter

Blå krydser = Bundhævning 0-5 meter

Grønne krydser = Bundhævning 0-2 meter

Røde krydser = reference

Opmåling, reference

Terræn Højre

Terræn venstre

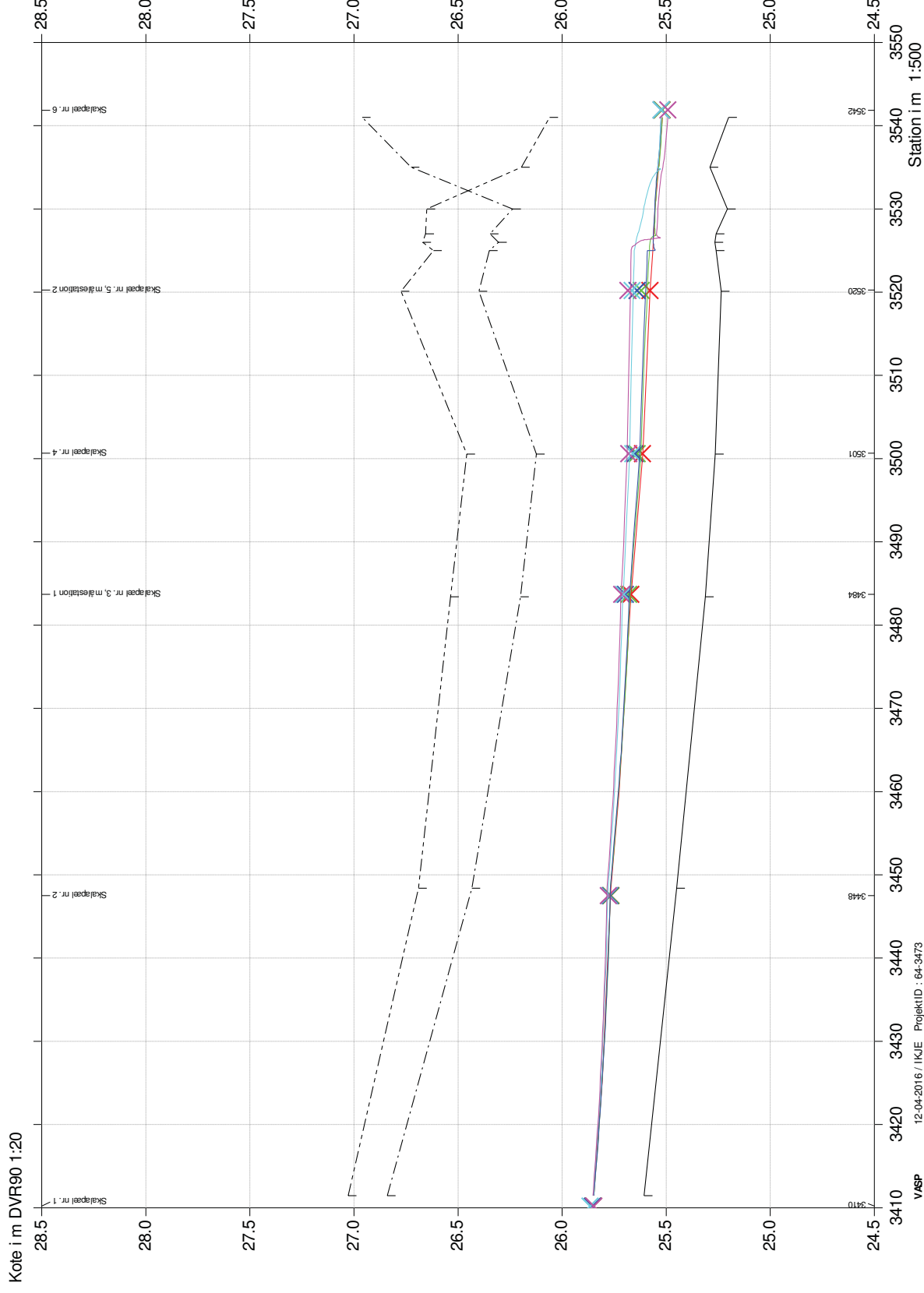
Bund

stryg

Bundhævning: ca. 0-10 meter

Bundhævning: ca. 0-5 meter

Bundhævning: ca. 0-2 meter



Kimmerslev Møllebæk

Grønne krydser = Bundhævning 0-2 meter

Røde krydser = reference

— Opmåling, reference

- - - - - Terræn Højde

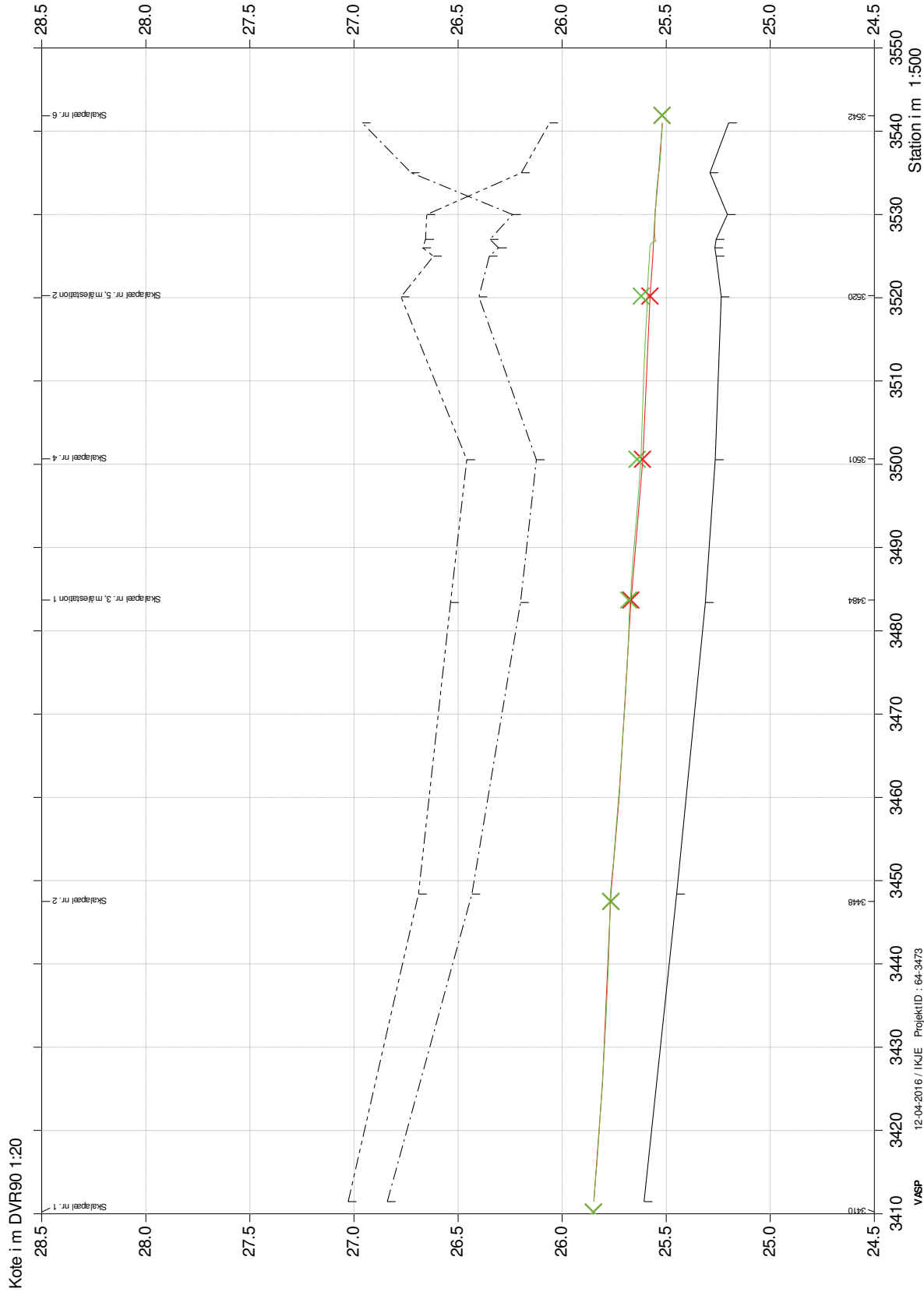
- . - . - Terræn venstre

— Bund

— Bundhævning: ca. 0-2 meter



Feltforsøg 19. nov. 2015 Bilag 2a



Kimmerslev Møllebæk

Blå krydser = Bundhævning 0-5 meter

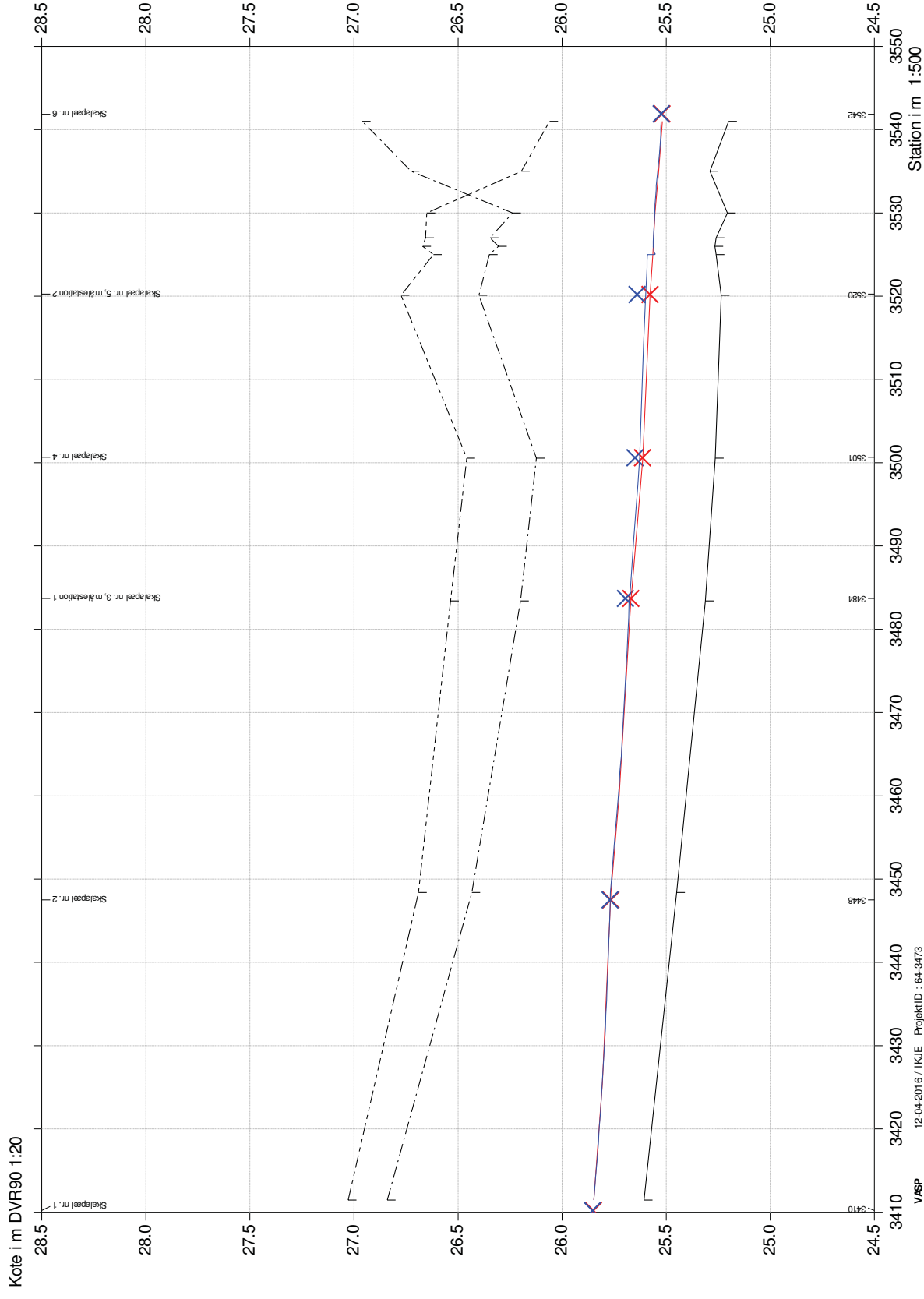
Røde krydser = reference



Feltforsøg 19. nov. 2015 Bilag 2b

- Opmåling, reference
- - - - - Terraen Højre
- . - . - - Terraen venstre
- Bund

— Bundhævning: ca. 0-5 meter



Kimmerslev Møllebæk

Turkis krydser = Bundhævning 0-10 meter

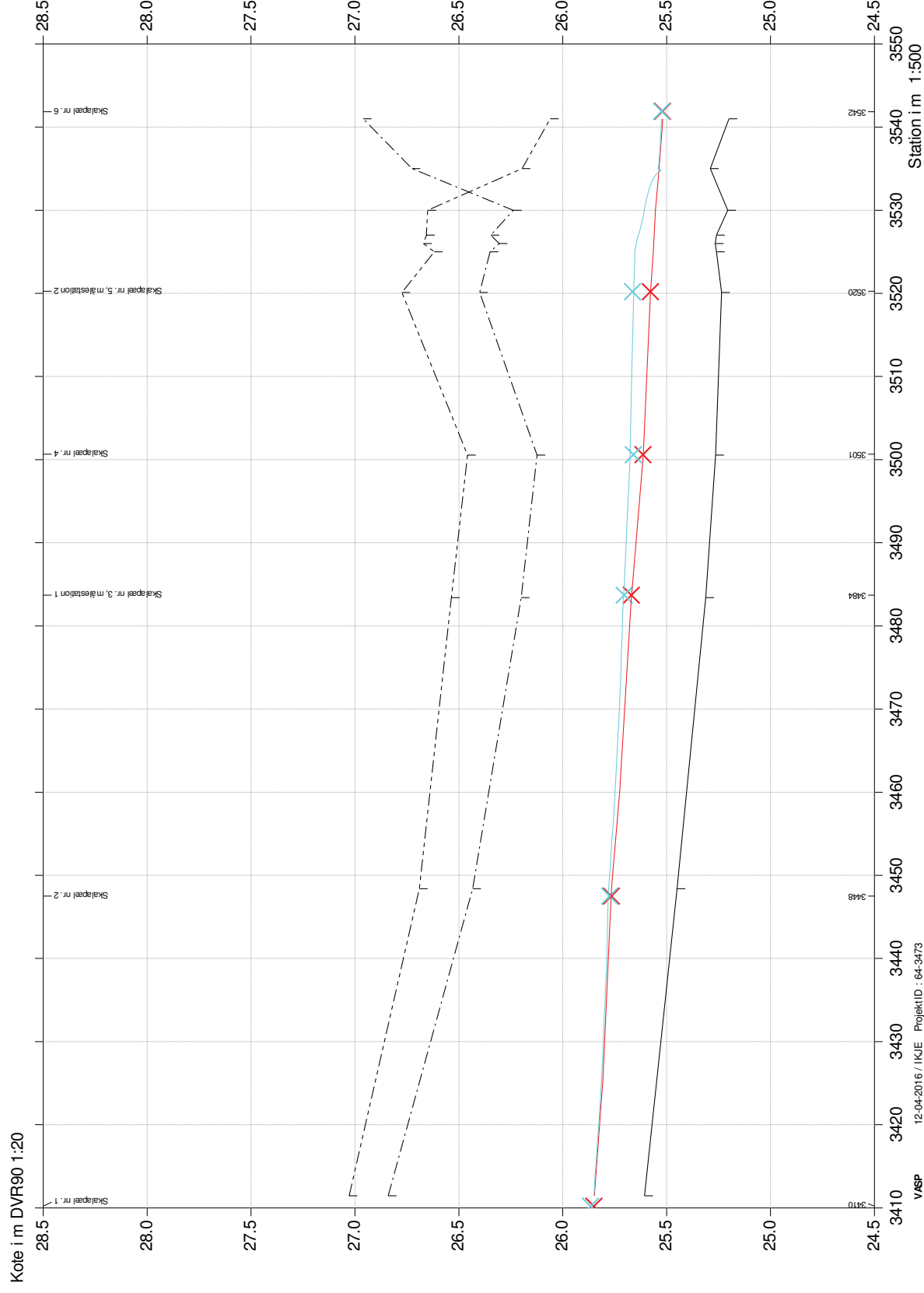
Røde krydser = reference



Feltforsøg 19. nov. 2015 Bilag 2c

- Opmåling, reference
- - - - - Terræn Højre
- . - . - Terræn venstre
- Bund

— Bundhævning: ca. 0-10 meter



Kimmerslev Møllebæk

Lysørøde krydser = Stryg ca. 20 cm højde i 0-2 meter

Røde krydser = reference

Opmåling, reference

Terræn Højre

Terræn venstre

Bund

stryg



Feltforsøg 19. nov. 2015 Bilag 2d

