Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

SCALGO+LAR: Digitale designværktøjer til naturbaserede regnvandsløsninger MUDP-projekt

MUDP

November 2026

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:
Sara Lerer, SCALGO ApS
Morten Revsbæk, SCALGO ApS
Peter Steen Mikkelsen, DTU Miljø
Hjalte Jomo Danielsen Sørup, DTU Miljø

ISBN: 978-87-7564-168-0

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrations-program

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Lerchesgade 35, 5000 Odense| Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
MUDP's hjemmeside

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	**Sammenfatning**	**5**
2.	**Indledning**	**6**
3.	**Designværktøjer**	**8**
3.1	Oplandskarakterisering	8
3.2	Værktøjer til redigering i terrænet	9
3.2.1	Fleksible tværsnit	9
3.2.2	Fleksible bassiner	11
3.2.3	Import/eksport overfor arkitekters tegneprogrammer	13
4.	**Modelleringsværktøjer**	**14**
4.1	LAR-potentiale værktøjet	14
4.2	Realistiske afstrømningsmængder	15
5.	**Kommunikation**	**20**
5.1	Webinarer	20
5.2	Konferencedeltagelse	21
5.3	Artikler i fagblade	21
6.	**Eksempel på anvendelse: Hulemarken**	**22**
7.	**Konklusion**	**24**
8.	**Litteratur**	**25**

1. Sammenfatning

Formålet med projektet har været at skabe et digitalt værktøj for design af naturbaserede regnvandsløsninger: et værktøj som er enkelt og hurtigt at anvende, og samtidig giver pålidelige og relevante svar på de vigtigste spørgsmål, der stilles i de tidlige designfaser.

Resultatet fra projektet er en række værktøjer, der er nyttige hver for sig, og kan tilmed kombineres i et workflow der dækker stort set alle relevante behov ifm. tidlig design af naturbaserede regnvandssystemer. De værktøjer, der er tilgængelige i SCALGO Live, inkluderer:

- Oplandskarakterisering: et opland, der bidrager med overfladeafstrømning til en regnvandsløsning, beskrives nu ikke kun med størrelse, men også med fordeling af befæstelsestyper og jordarter.
- Fleksibel redigering i terræn: værktøjerne til at ændre i terrænet og forme det til naturbaserede regnvandsløsninger, er øget fra en række simple værktøjer baserede på firkantede elementer, til at inkludere variable skråningsanlæg og afrundede elementer baseret på avanceret højdekurveteknologi.
- Realistisk afstrømning: brugerne kan nu vælge variable for realistisk afstrømning fra forskellige typer overflader, baseret på de indbyggede oplysninger om befæstelse og jordarter, og baseret på avancerede simuleringer af nedbørsafhængig afstrømning fra forskellige typer jord.

Dertil kommer LAR-potentiale værktøjet, som er udviklet med en brugergrænseflade i Excel, og er tilgængeligt for alle via klimatilpasning.dk. LAR-potentiale giver brugerne mulighed for at vurdere effekten af forskellige typer af naturlige regnvandsløsninger (og kendt som LAR-elementer) ud fra konkrete stedspecifikke oplysninger om oplandet (som nemt kan undersøges i SCALGO Live) og brugervalgte dimensioner.

Vi forventer, at værktøjerne til sammen vil bidrage til, at fremtidige regnvandsløsninger, både i Danmark og i udlandet, bliver mere naturbaserede, og dermed gavner miljøet og menneskers trivsel, via øget biodiversitet og mindsket udslip af drivhusgasser, samt øget udendørs rekreation medførende øget helbred og velvære.

2. Indledning

Formålet med projektet har været at skabe et digitalt værktøj for design af naturbaserede regnvandsløsninger: et værktøj som er enkelt og hurtigt at anvende, og samtidig giver pålidelige og relevante svar på de vigtigste spørgsmål, der stilles i de tidlige designfaser.

Naturbaserede regnvandsløsninger har en række fordele ift. traditionelle regnvandsløsninger. Naturbaserede regnvandsløsninger anlægges hovedsageligt på terræn, baserer sig på de naturlige hældninger i terrænet, og består i højere grad af naturlige og lokale materialer (jord og planer). Det mindskede behov for gravearbejde, både ift. terrænregulering og nedgravning af ledninger, samt det mindskede behov for CO_2-tunge materialer som beton, asfalt og plastic, medfører et lavere CO_2-fodaftryk for de naturbaserede regnvandsløsninger. Dertil kommer, at naturbaserede regnvandsløsninger kan designes så de understøtter øget biodiversitet og fremmer udendørs rekreation, til gavn for beboernes helbred og trivsel.

Det er vigtigt at der træffes fornuftige beslutninger om placering og dimensionering af naturbaserede regnvandsløsninger allerede i de tidlige designfaser, da det ellers kan blive svært at finde plads til håndtering af regnvand de rette steder i terrænet, når arkitekterne allerede har fastsat et layout for et område. Derfor er det også vigtigt, at der findes værktøjer, der kan benyttes af arkitekterne selv, da det sjældent er muligt for dem, i de tidlige faser, at få leveret de relevante analyser fra ingeniørerne. Derfor er det vigtigt, at værktøjerne er kompatible med arkitekternes kompetencer, behov og ønsker. Samme enkle værktøjer er også til nytte for ingeniører, når de arbejder i de tidlige designfaser, hvor der ikke er behov for stor nøjagtighed i beregningerne, og det er at foretrække at anvende værktøjer, der er mindre tidskrævende.

SCALGO Live er en platform, der allerede ved projektets start blev benyttet flittigt af mange brugere til at analysere oversvømmelser og vandstrømme på terræn, og til at teste ideer til håndtering af vand på terrænet. SCALGO Live er bygget op som et meget brugervenligt værktøj, der ikke kræver stor ekspertise at anvende. Det har en nem og intuitiv brugergrænseflade, og er meget visuelt, hvilket også gør det egnet til formidling og dialog omkring løsningsmuligheder. Derfor var det oplagt at bruge SCALGO Live som afsæt, og indbygge det nye værktøj ind i den allerede velafprøvede og populære platform.

For at opnå projektets mål, har det været nødvendigt med udvikling på to fronter:

1. Der var brug for en række nye værktøjer og data, som tilsammen gør det nemt og hurtigt at skitsere naturbaserede regnvandsløsninger i de tidlige faser af et projekt (Designværktøjer).
2. Der var brug for nye tilgange til at modellere effekten af naturbaserede regnvandsløsninger, så modelleringen bliver hurtigere og ikke kun kan udføres af eksperter (Modelleringsværktøjer).

Oprindeligt ønskede vi at skabe et samlet modul i SCALGO Live, der samlede alle de relevante værktøjer. Undervejs mødte vi nogle forhindringer, der gjorde, at vi vurderede, at det var bedst at lade dem stå hver for sig. Mange af de udviklede værktøjer er tilgængelige som nye funktioner i SCALGO Live, mens LAR-potentiale beregneren står som selvstændigt værktøj (implementeret i Excel og offentligt tilgængeligt via klimatilpasning.dk). Værktøjerne er nyttige hver for sig, og kan tilmed kombineres i et workflow, der dækker stort set alle relevante behov ifm. tidlig design af naturbaserede regnvandssystemer.

I det følgende beskriver vi de enkelte værktøjer, fortæller lidt om deres udvikling, og forklarer hvordan de kan anvendes. Vi henviser også til en række øvrige dokumenter, videoer og

publikationer, der beskriver de forskellige værktøjer og deres anvendelse i flere detaljer og/eller med flere anvendelseseksempler. Til sidst beskriver vi en case, hvor Tegnestuen Vandkunsten har anvendt værktøjerne til udvikling af naturbaserede regnvandsløsninger ifm. med en rammelokalplan for et stort barmarksprojekt (Hulemarken).

3. Designværktøjer

3.1 Oplandskarakterisering

Fra et tidligt tidspunkt i projektet var det tydeligt at et helt centralt input til de nye modelleringsværktøjer ville være befæstelsesgrader for oplandet af den naturbaserede regnvandsløsning. Vi udviklede derfor ny funktionalitet i SCALGO Live der kan give befæstelsesgraden af ethvert opland på en hurtig og nem måde.

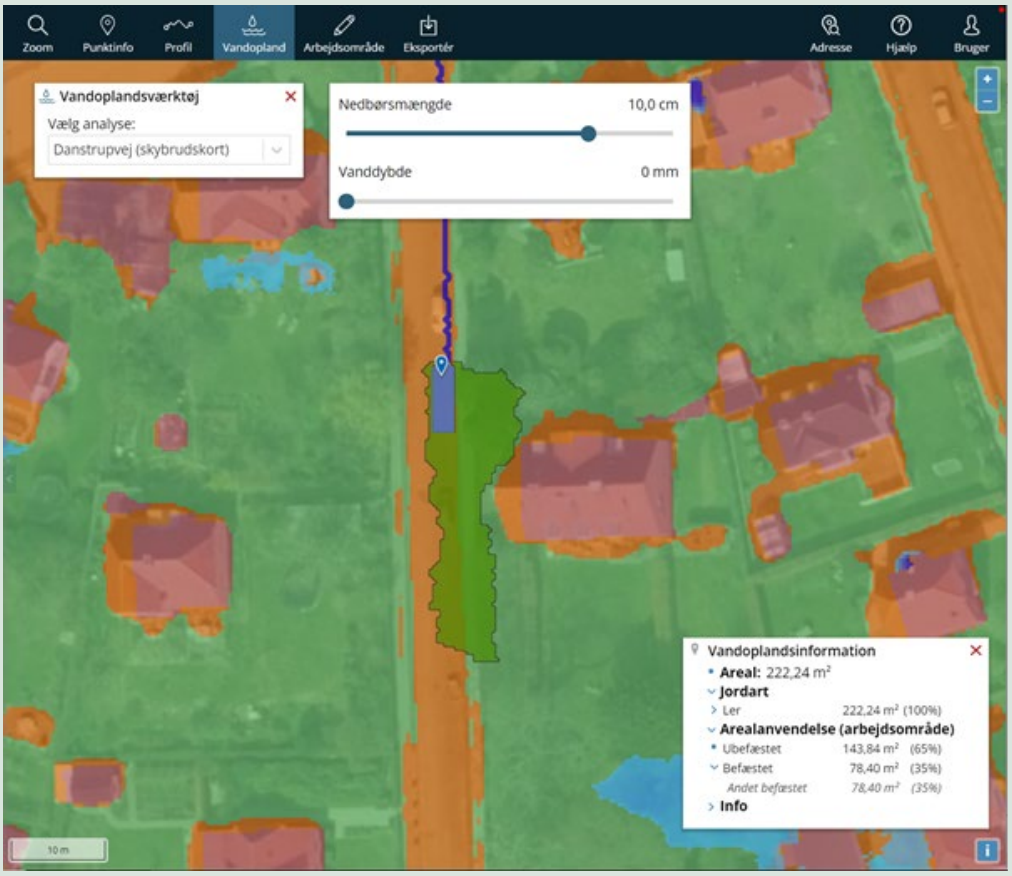
Muligheden for at karakterisere et opland til en regnvandsløsning bygger videre på to teknologier:

- Et værktøj der kortlægger det topografiske opland til ethvert punkt ud fra analyse af strømningsveje baseret på den nationale højdemodel. Dette værktøj fandtes i SCALGO Live da projektet startede.
- Et kort over befæstelsesgrader. Ved projektets start fandtes der ikke et opdateret nationalt kort over forskellige arealers befæstelsesgrad. I et andet projekt (mellem SCALGO og Aarhus Universitet) gik vi derfor i gang med at udvikle sådan et kort, baseret på nyeste teknologi indenfor machine learning. Partnerne i nuværende projekt bidrog med lokale dataset, der blev brugt til både at træne og teste machine learning-algoritmen.

Dertil manglede der en kobling mellem vandoplandsværktøjet og øvrige datagrundlag. Denne teknologi blev udviklet i nærværende projekt. Som resultat indeholder vandoplandsværktøjet nu oplysninger om fordelingen af befæstelsesgrader inden for ethvert vandopland der forespørges om.

Samme teknologi blev også anvendt til at karakterisere oplande ift. hvilke jordtyper der findes i dem. Datagrundlaget herfor er GEUS' kort over jordarter, som vi simplificerede til at udtrykke den mest dominerende sedimenttype (ler, sand, silt osv.).

FIGUR 1 på næste side viser et eksempel på anvendelse af vandoplandsværktøjet.



FIGUR 1. Udklip fra SCALGO Live brugerinterface, hvor vandoplandsværktøjet anvendes til at kortlægge og karakterisere oplandet til et vejbed; markøren (den blå dråbe) viser et punkt inden i vejbedet, der ses som en blå firkant, mens oplandets omrids er tegnet med tynd sort streg og fyldt med klar grøn farve. Baggrunden viser befæstelseskortet oven på et luftfoto, hvor grøn indikerer ubefæstet, rød indikerer bygninger, og orange indikerer andre befæstede arealer (veje, fortove og andre belægninger). Infoboksen i nedre højre hjørne viser at oplandet til bedet er mestendels ubefæstet (65%), og en mindre del er befæstet (35%). Jordarten i hele oplandet er ler (100%).

3.2 Værktøjer til redigering i terrænet

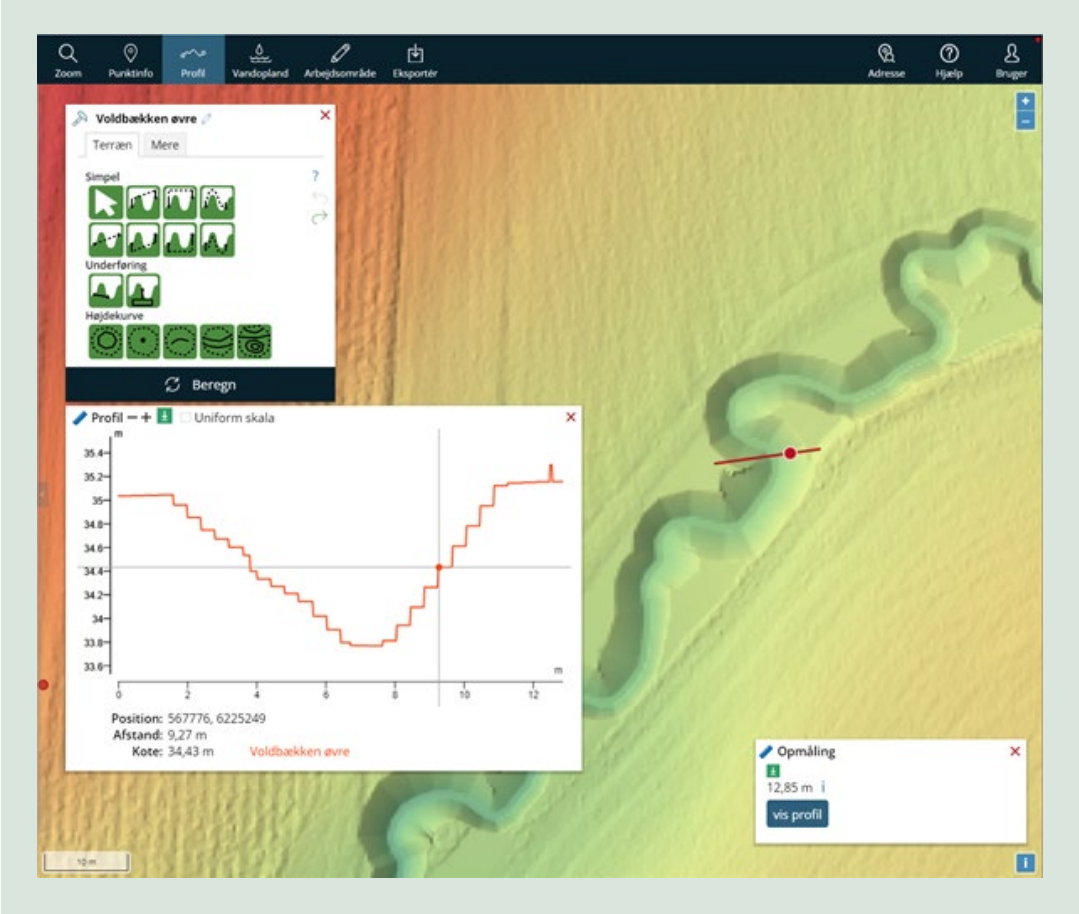
Naturbaserede løsninger til håndtering af regnvand implementeres ofte i terrænets overflade (i modsætning til traditionelle løsninger som hovedsageligt implementeres under terræn). Det tilstræbes at løsninger på terræn får et naturligt udtryk, dvs. med bløde kurver, asymmetriske former osv., således at de bidrager til at skabe et landskab der er æstetisk, fremmer rekreation og bevægelse, og understøtter biodiversitet. De værktøjer til redigering i terræn, der fandtes i SCALGO Live i projektets start, var baseret på lige linjer og firkantede former, og var således ikke udtryksfulde nok til at kunne modellere formen på naturbaserede løsninger. Vi udviklede derfor en række nye værktøjer som samlet set gør det muligt at designe præcis den løsning som en landskabsarkitekt forestiller sig. Disse beskrives i mere detalje nedenfor.

3.2.1 Fleksible tværsnit

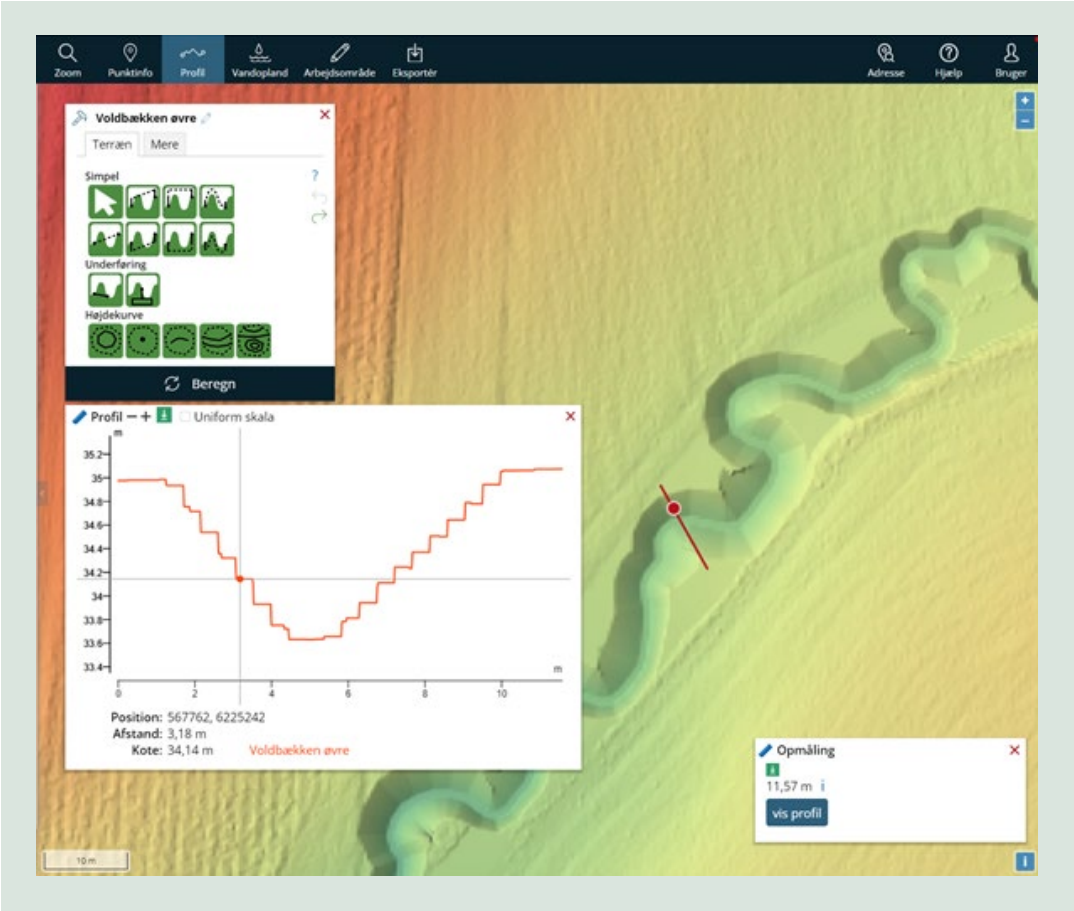
I SCALGO Live kan man (virtuelt) anlægge grøfter i terrænet ved at specificere deres tværsnitsform og tegne deres tracé på kortet, og på denne måde styre hvor vand løber hen og samler sig (f.eks. hen til et regnbed eller et bassin). Ved projektets opstart kunne grøfter kun antage en simpel firkantet form. Med de fleksible tværsnit udviklet i projektet kan brugeren

specificere anlæg på siderne af grøfter, som tilmed kan være forskellige fra side til side, og ændre sig langs tracéet. En del nye dialogvinduer er kommet til, for at tillade brugeren at styre formen ned i mindste detalje.

Figurerne nedenfor viser et eksempel fra Voldbækken i Århus, hvor et stykke af bækken, der tidligere var blevet strømlinet, nu er blevet genslynget. Muligheden for fleksible tværsnit blev udnyttet til sit fulde potentiale i dette projekt, idet sidernes hældning ændres for hver bugt i tracéet, så indersiden af bugtningen bliver mindre stejl og ydersiden mere stejl.



FIGUR 2. Udklip fra SCALGO Live: et stykke af Voldbækken er blevet genslynget i SCALGO Live (og senere i virkeligheden); den røde streg på kortet viser hvor tværsnit er taget; tværsnittet i profilvinduet viser at hældningen mod øst her er stejlere end hældningen mod vest.

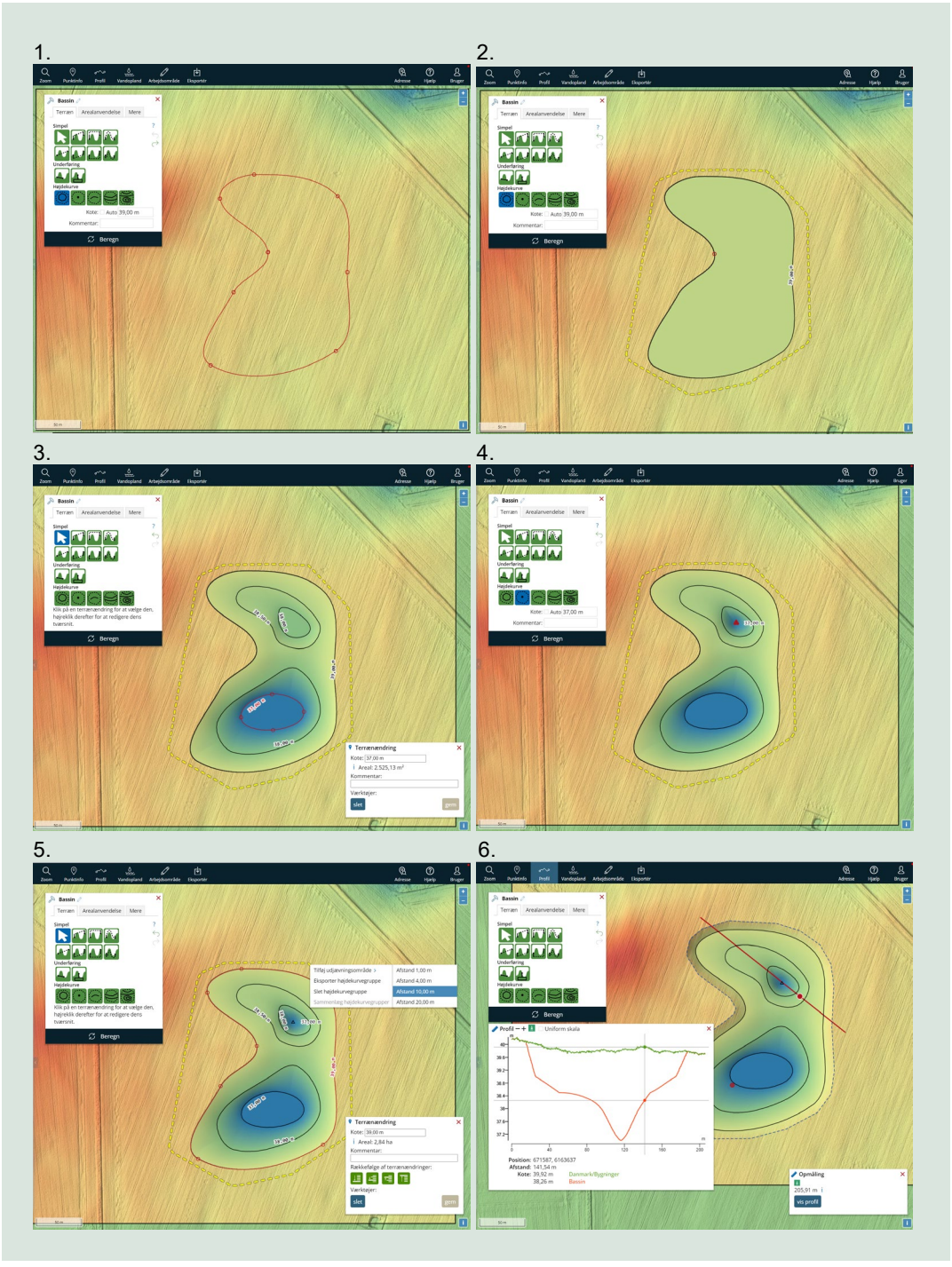


FIGUR 3. Udklip fra SCALGO Live: et stykke af Voldbækken er blevet genslynget i SCALGO Live (og senere i virkeligheden); den røde streg på kortet viser hvor tværsnit er taget; tværsnittet i profilvinduet viser at hældningen mod vest nu er stejlere end hældningen mod øst.

3.2.2 Fleksible bassiner

I starten af projektet kunne et bassin i SCALGO Live kun være firkantet og med flad bund. En hel ny gruppe af funktioner blev introduceret i projektet, hvor redigering i terrænet kan ske via højdekurver. Højdekurverne er, som navnet indikerer, kurvede (runde), og styres af brugeren ved at fiksere enkeltpunkter langs kurven. På denne måde kan der meget hurtigt og nemt tegnes avancerede og naturligt udseende former. Kurverne kan tilføjes inden for og uden om hinanden, og for hver kurve kan brugeren specificere en eksakt kote. På den måde kan bassinets hældning og form styres i alle tre dimensioner.

Figuren nedenfor viser nogle af de skridt der foretages i processen med at tegne et naturligt formet bassin vha. kurveeditering.



FIGUR 4. Seks screenshots der illustrerer processen med at udforme et naturligt udseende bassin vha. kurveredigering i SCALGO Live. I første billede tegnes den overordnede form på baggrund af det eksisterende terræn, og i andet billede ses resultatet af første skridt, hvor arealet indenfor kurven får tildelt ens kote. I tredje billede ses resultatet af at tegne yderligere kurver inden for den første kurve og tildele dem gradvist lavere koter. I fjerde billede ses resultatet af at specificere kote for et bestemt punkt inden for en kurve. I femte billede ses dialogvinduet for automatisk tegning af et udjævningsområde rundt om bassinet. I sjette billede ses et resulterende tværsnit hen over bassinet (bemærk at skalaen på akserne ikke er uniform).

3.2.3 Import/eksport overfor arkitekters tegneprogrammer

Når arkitekter tegner lokalplaner, arbejder de med mange forhold udover håndtering af vand (bebyggelse, lys, støj, adgangsforhold, parkeringspladser mm.). Derfor er det vigtigt for dem at kunne arbejde i deres sædvanlige designværktøjer parallelt med arbejdet i SCALGO Live, og derfor var det nødvendigt at udvikle kompatibilitet med centrale filformater indenfor arkitekt-målrettede tegneprogrammer. Nu kan man nemt eksportere det eksisterende terræn som højdekurver fra SCALGO Live til arkitektens tegneprogram, tegne f.eks. veje og huse oven på terrænet i tegneprogrammet, eksportere det til SCALGO Live, forme terrænet mellem husene og langs vejene i SCALGO Live (og teste at designet har den ønskede effekt ift. håndtering af regnvand), eksportere det editerede terræn fra SCALGO Live tilbage til arkitekternes tegneprogram så der kan arbejdes videre med andre elementer der, osv. frem og tilbage iht. de sædvanlige iterationer i en designproces på en tegnestue.

4. Modelleringsværktøjer

Det har været et mål for projektet, at brugeren i SCALGO Live kan få et estimat af effekten af at implementere forskellige typer naturbaserede regnvandsløsninger. Estimatet skulle kunne ses nemt og hurtigt efter at et element blev tegnet ind i et arbejdsområde. Den oprindelige plan for at kunne vise sådanne estimater byggede på en videreudvikling af værktøjet LAR-potentiale, der forelå som prototype ved projektets start. Der blev tidligt i projektet udviklet en teknisk løsning der viste at det var muligt at koble LAR-potentiale værktøjet til SCALGO Live (via opslag i SQLite databaser). Derefter blev LAR-potentiale videreudviklet på DTU og testet på forskellige cases, samtidig med at de mere teoretiske udfordringer ved koblingen blev drøftet løbende.

Hovedudfordringen bestod i, at brugerinterfacet i SCALGO Live tillader brugeren at tegne et ubegrænset antal elementer (til håndtering af regnvand), i vilkårlig rækkefølge (både i serie og parallelt), mens LAR-potentiale værktøjet kan håndtere en begrænset antal elementer, hvor nogle må forekomme parallelt mens andre kun må forekomme i serie. Efter mange og lange drøftelser mellem DTU og SCALGO, blev det i fællesskab besluttet at estimering af effekten inde i SCALGO Live varetages bedst vha. den teknologi, der lå i skybrudskortet, hvis denne blev videreudviklet til at give mere realistiske afstrømningsmængder. Denne fremgangsmåde giver et mere groft estimat af effekten af hvert element i SCALGO Live, men til gengæld er der ingen grænse for hvor mange elementer der kan indgå eller hvordan de står ift. hinanden.

Et fælles arbejde blev indledt på at designe, udvikle og teste en pixel-baseret model for nedbør-afstrømning i SCALGO Live. Samtidig blev LAR-potentiale værktøjet færdigudviklet som et selvstændigt værktøj, der kan estimere effekten af enkeltstående elementer, baseret på detaljerede modeller af hydrologien i hver type element. LAR-potentiale regnearket kan bruges i kombination med SCALGO Live, hvor brugeren i SCALGO Live kan finde oplysninger om et elements opland, der skal bruges som input til regnearket, og output fra regnearket kan bruges til at kvalificere effekten af enkelte elementer tegnet i SCALGO Live.

4.1 LAR-potentiale værktøjet

LAR-potentiale værktøjet tillader brugeren at få et estimat af effekten af forskellige typer naturbaserede regnvandsløsninger. Værktøjet har et brugerinterface i Excel, og er frit tilgængeligt til download fra klimatilpasning.dk, hvor der også ligger en brugervejledning. Det er nemt og hurtigt at anvende, og kan tilpasses brugerens ønsker mht. oplagte designparametre indenfor de forskellige elementtyper.

LAR-potentiale værktøjet er udviklet ved at bygge hydrologiske modeller op for de mest anvendte typer af LAR/naturbaserede regnvandsløsninger, definere rækker af realistiske værdier for diverse input parametre, køre langtidssimuleringer med alle realistiske kombinationer af inputparametre (mange tusind kombinationsmuligheder), udtrække relevante simuleringsresultater, bearbejde dem statistisk, og gemme resultaterne i opslagstabeller. Således får brugeren, ved simple opslag, adgang til simuleringsresultater, der normalt vil kræve ekspertise inden for modellering og tid til modelopsætning og simulering.

De hydrologiske modeller er bygget op i SWMM (Storm Water Management Model), som er et gratis open-source simuleringsværktøj udviklet af det amerikanske miljøbeskyttelsesagentur (US EPA). For at kunne definere realistiske og karakteristiske LAR-elementer i programmet, brugte vi både videnskabelig og ”grå” litteratur, og konsulterede projektets slutbruger-repræsentanter.

For at køre de mange langtidssimuleringer, der kombinerede de realistiske inputværdier inden for de definerede intervaller, udviklede vi kode i python, hvor vi blandt andet benyttede pakken pyswmm til at styre simuleringerne i SWMM og udtrække de relevante resultater. Den samlede kodepakke sørger for at gentage simuleringer for alle kombinationer af inputværdier inden for de definerede intervaller, processere resultater, og gemme dem i databaser.

For at give brugerne en simpel adgang til resultatdatabaserne, udviklede vi et brugerinterface i Excel. Her kan brugeren indtaste de ønskede inputværdier, og få præsenteret de relevante effektestimater både i tabeller og grafer.

LAR-potentiale værktøjet er dokumenteret i øvrige publikationer, se afsnittet kommunikation.

4.2 Realistiske afstrømningsmængder

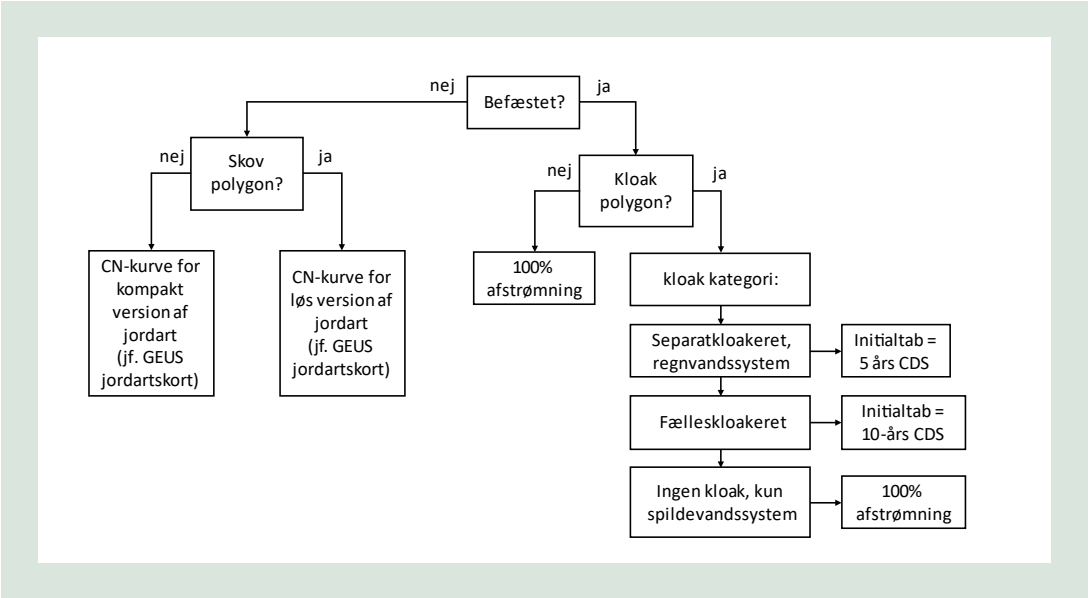
Skybrudskortet er den del af SCALGO Live der analyserer hvor vand, der faldet på terrænet som regn, vil strømme hen, og hvor det vil samle sig. Analysen tager udgangspunkt i den nationale højdemodel, som har en opløsning på 0,4 m x 0,4 m. Brugeren specificerer, vha. en "slider", hvor meget regn der skal falde over området, i mm. Algoritmen bag analysen tildeler herefter et volumen til hver pixel, som produkt af regndybden ganget med pixlens areal, og derefter finder den ud af hvor det vandvolumen vil strømme hen og fylde fordybninger op (og hvornår disse fordybninger vil være fyldt, og vandet vil strømme videre nedstrøms).

I begyndelsen af projektet fungerede skybrudskortet som en "glasplade", dvs. at alt regnvand, der faldt på enhver pixel, strømmede af. I virkeligheden vil noget af regnvandet blive optaget i den pixel det falder på. Den forsimplede "glasplade"-model er nyttig i situationer, hvor der falder så meget regn, at den mængde vand der bliver optaget er meget lille ift. den mængde vand der strømmer af (f.eks. ved meget store skybrud). Men når man designer naturbaserede regnvandsløsninger, skal disse også fungere i situationer hvor der falder mere moderate mængder vand. I disse situationer vil "glasplade"-modellen stærkt overestimere mængden af regnvand der strømmer til løsningerne, og således give anledning til forkerte estimater af deres effekt. Derfor blev det sat som mål i projektet at udvikle en model der kunne beregne mere realistiske volumener af afstrømning fra hver pixel, afhængigt af mængden af regn som brugeren ønsker at simulere – en såkaldt nedbør-afstrømningsmodel.

Der findes en del forskellige nedbør-afstrømningsmodeller, med varierende grader af kompleksitet og antal af variable. Det var vigtigt at den nedbør-afstrømningsmodel vi valgte til skybrudskortet ville være simpel og kræve få inputs, for at matche den øvrige funktionalitet i SCALGO Live. Samtidig var det vigtigt at modellen gav troværdige resultater, der tog højde for de variationer der findes mellem forskellige overflader og forskellige typer regn, og kunne tilpasses lokalt efter brugernes ønsker.

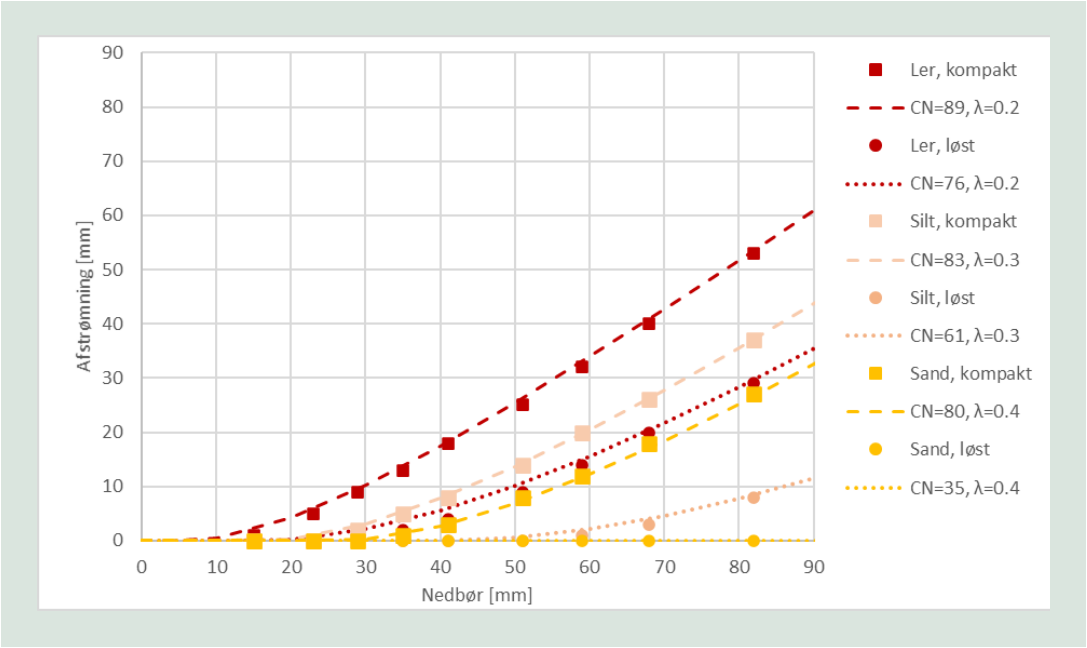
Den endelige model, der i skrivende stund er ved at blive implementeret i det nationale skybrudskort, fungerer som vist i FIGUR 5 nedenfor. Den fulde tekniske dokumentation for metoden kan læses i Bilag A. Herunder følger en opsummering af metoden.

Først tjekkes om overfladen i en given pixel er befæstet eller ej (jf. befæstelseskortet beskrevet under Oplandskarakterisering). Hvis pixlen er befæstet, ses der på om den falder inden for en polygon i kortet over kloakeringsforhold (fra plandata.dk). Hvis den er udenfor en kloakpolygon, eller kloakpolygonen indikerer at der ikke er noget kloaksystem eller kun et system til spildevand, antages det at alt vand strømmer af overfladen og videre på terræn. Hvis den er indenfor en af de øvrige kloakpolygoner, antages at vandet vil strømme fra overfladen og ned til kloaksystemet, men hvis kloaksystemets kapacitet overskrides, vil det overskydende vand strømme på terræn. Dette repræsenteres ved en simpel model hvor afstrømning er lige med regn minus et initialtab. Initialtabets størrelse afhænger af hvorvidt systemet antages at være designet til at håndtere en 5-års regn eller en 10-års regn.



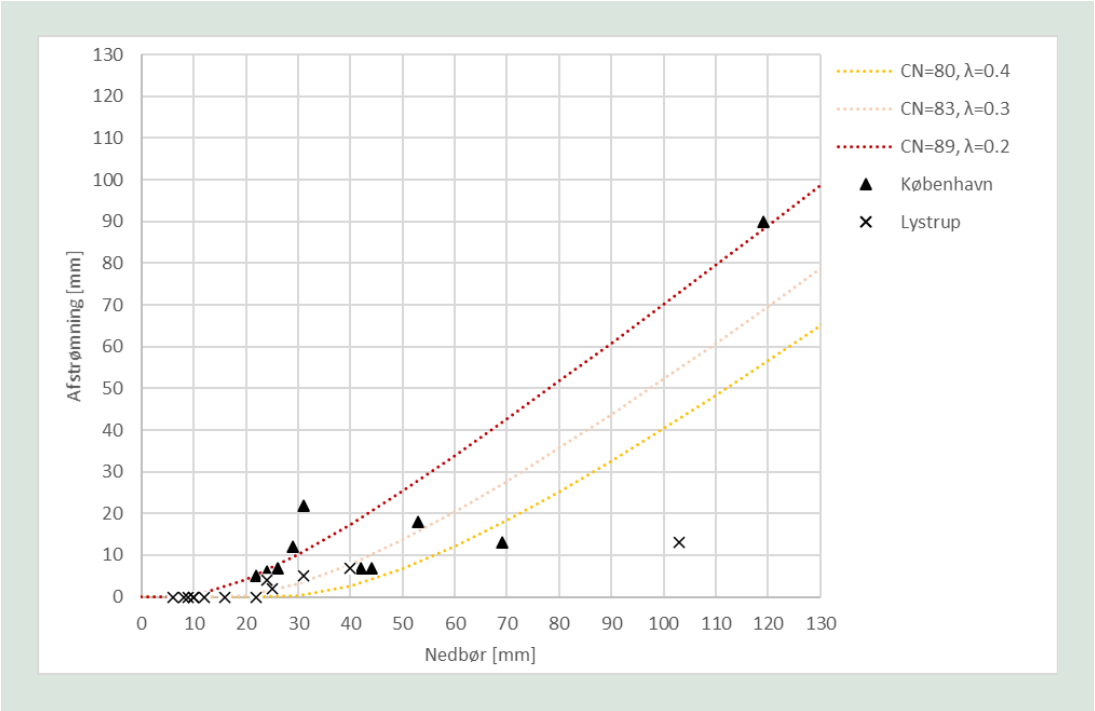
FIGUR 5. Beslutningstræ for valg af nedbør-afstrømningsmodel for hver pixel i SCALGO Live skybrudskort.

Hvis pixlen er ubefæstet, bruges en CN-kurve. CN står for Curve Number, og er en nedbør-afstrømningsmodel udviklet i USA. Den konkrete kurve vælges ud fra hvilken type jord, der forventes i pixlen, og hvor vidt jorden forventes at være kompakteret eller ej. Typen af jord afgøres ved opslag i den forsimplede version af GEUS' jordartskort (som beskrevet under Oplandskarakterisering). Antagelsen er, at den sedimentfraktion der er dominerende ved 1-meters dybde, også er dominerede ved jordens overflade (selvom lokale forholde kan bevirke nogle ændringer mellem de jordlag). Kompakteringsgraden afgøres af hvorvidt pixlen befindes sig inden for en skovpolygon (her bruges temaet Skov fra GeoDanmark). For hver af de fire jordtyper, i både kompakt og løs form, har vi kørt en simulering, hvor vi ser hvor meget vand der afstrømmer under regnhændelser med forskellige gentagelsesperioder (2-500 år). Afstrømningen beregnes som regn minus nedsivning, og som nedsivningsmodel har vi brugt Hortons ligning. Derefter har vi, for hver jordtype, valgt en CN-kurve der passer til simuleringsresultaterne. Simuleringsresultater og CN-kurver er vist i FIGUR 6 nedenfor.



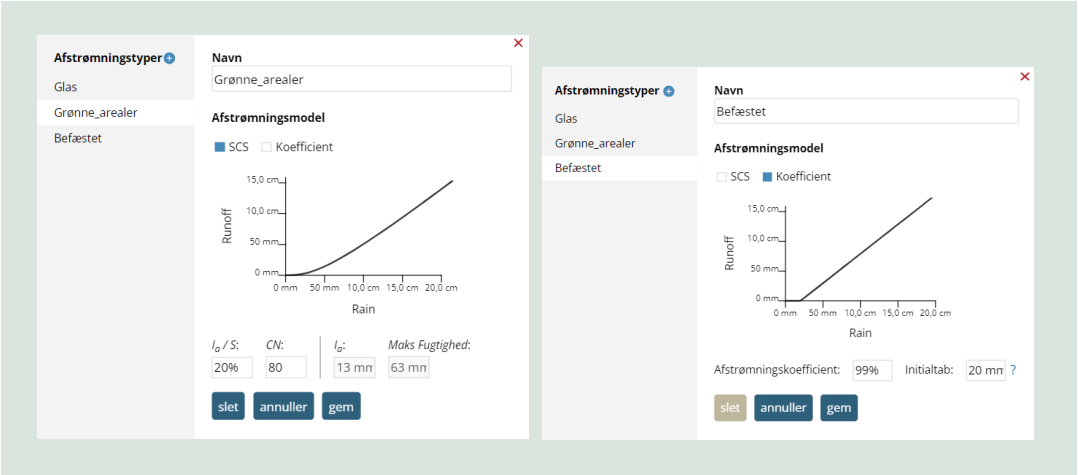
FIGUR 6. Nedbør-afstrømningsmodel for ubefæstede pixels. Punkterne repræsenterer resultater af simulering af afstrømning fra forskellige typer jord, ved CDS-regnhændelser med forskellige gentagelsesperioder. De stiplede linjer repræsenterer de CN-kurver der er valgt til hver jordtype. Jordarten grus er ikke medtaget i figuren da alle simuleringer resulterede i nul afstrømning.

Vi har sammenlignet de valgte CN-kurver med den oprindelige CN-metode og med andre studier. Begge sammenligninger bekræfter, at de valgte kurver giver en fornuftig forudsigelse af afstrømningsmængden. I FIGUR 7 nedenfor ses sammenligning med to forskellige studier. I det ene studie er der foretaget simuleringer af nedsivning i en leret græsplæne i København med en historisk regnserie (Davidsen *et al.*, 2018). I det andet er der foretaget fysiske målinger af afstrømning fra en leret græsplæne i Lystrup (ved Aarhus) (Nielsen *et al.*, 2019). Der ses en vis spredning i punkterne fra disse studier, men overordnet ligger de forholdsvist tæt på den kurve, der er valgt til kompakteret lerjord (CN=89). Det enkelte punkt fra København, der ligger markant over kurven, er fra en usædvanlig høj-intens regnhændelse. Det punkt fra Lystrup, der ligger markant under kurverne, er fra en usædvanlig lang og lav-intens regnhændelse. Generelt ligger punkterne fra Lystrup lavere end fra København for de mindre regnhændelser, hvilket kan skyldes mange faktorer, herunder regnhændelsernes intensitet, den konkrete sammensætning af sedimenter i de to jorde, og forskelle i hvor kompakteret jorden er (hvor meget aktivitet der foregår på græsplænen).



FIGUR 7. Sammenligning mellem valgte CN-kurver og afstrømningsmængder jf. andre studier. De stiplede linjer viser CN-kurver for kompakteret jord domineret af henholdsvis ler, silt og sand. Trekanter viser resultater fra et studie, hvor der er blevet simuleret nedsivning i en leret græsplæne i København med en historisk regnserie (Davidsen *et al.*, 2018). Krydser viser resultater fra et studie, hvor der er blevet målt afstrømning fra en græsplæne i Lystrup (Nielsen *et al.*, 2019).

Såvel valgte CN-kurver for ubefæstede pixels som valgte initialtab for befæstede pixels er simplificerede modeller af virkeligheden som er behæftet med en del usikkerhed. På national skala giver de dog en markant forbedring af skybrudskortets nøjagtighed ift. den tidligere "glasplade"-model. Når der arbejdes lokalt (i såkaldte "arbejdsområder" i SCALGO Live), har brugeren mulighed for at redigere i modellerne så de bedre passer til de lokale forhold. Her kan parametrene fra den nationale model bruges som et udgangspunkt, der kan forfines hvis brugeren har et bedre vidensgrundlag for estimering af afstrømning inden for sit arbejdsområde. FIGUR 8 nedenfor viser dialogvinduet i SCALGO Live hvor brugeren kan specificere afstrømningsmodeller for forskellige typer af pixels.



FIGUR 8. Dialogvinduet i SCALGO Live til valg af nedbør-afstrømningsmodel. Til venstre ses en model for grønne arealer, hvor der vælges CN-kurve 80. Til højre ses en model for befæstede arealer, hvor der vælges en lineær model med initialtab på 20 mm og afstrømningskoefficient på 0,99.

5. Kommunikation

Gennem projektet har vi løbende informeret om de nye værktøjer, der blev udviklet. Hver gang der blev frigivet en større udvikling i SCALGO Live, har vi informeret brugerne gennem vores kommunikationskanaler (som er åbne for alle), herunder vores nyhedsbrev og vores webinarer. Derudover har vi deltaget med oplæg ved relevante faglige konferencer, og skrevet artikler til relevante faglige tidsskrifter.

5.1 Webinarer

Alle vores webinarer bliver optaget og ligger tilgængelige på vores hjemmeside scalgo.com. De mest relevante webinarer, der demonstrerer værktøjer udviklet i regi af nærværende projekt, omfatter:

- På dansk:
  - Lokal anvendelse af regnvand (LAR), 10 Jan 2022:
    - Præsentation af SCALGO+LAR projektet v/SCALGO
    - Præsentation af LAR-potentiale regnearket v/DTU
    - Demonstration af brug af SCALGO Live til design af naturbaseret regnvandsløsninger i en nyudstykning i Silkeborg, herunder udformning af terræn med grøfter med tilstrækkelig hældning, v/Silkeborg Forsyning
  - Regnvandshåndtering i byudvikling og lokalplanlægning, 23 Nov 2021:
    - Demonstration af brug af SCALGO Live til design af naturbaseret regnvandsløsninger i en masterplan for Køge Nord, herunder fleksibel terrænediting og tilpasset afstrømning, v/EnviDan
  - Infiltration og arealanvendelse, 8 Oct 2021:
    - Demonstration af brug af SCALGO Live til design af naturbaseret regnvandsløsninger i en rammelokalplan for Hulemarken, herunder både import/eksport fra CAD, editering af arealdække og afstrømningsfunktioner, og editering i terræn vha. højdekurver, v/vandkunsten
  - SCALGO Live Forum Webinar – Kurveediting, 10 Feb 2021:
    - Demonstration af de nye funktioner til editering af terræn via højdekurver og oplæring i at anvende dem, v/SCALGO
  - Nyt i SCALGO Live Efterår 2020, 3 Dec 2020:
    - Første demonstration af kommende funktioner til editering af terræn via højdekurver, samt demonstration af karakterisering af vandoplande ift. befæstelsesgrad, v/SCALGO
- På engelsk:
  - Infiltration and land use editing - focus UK, 20 Oct 2021
    - Detaljeret instruering i anvendelse af afstrømningsfunktioner med fokus på relevante kortgrundlag i UK, v/SCALGO
    - SCALGO Live: UK User Experiences, 8 Sep 2021:
      - Brug af fleksible terrænediteringsværktøjer til design af naturbaserede regnvandsløsninger ved stort infrastrukturprojekt, v/ The Environmental Protection Group Ltd.
    - New Release: Land use editing and Infiltration, 1 Jul 2021
      - Første præsentation på engelsk af de nye afstrømningsfunktioner
    - Natural Flood Management, 4 Mar 2021
      - Demonstration af brug af SCALGO Live til at tegne bassiner som naturbaserede løsninger til styring af oversvømmelser
    - SCALGO Live Forum Webinar - Contour Line Editing, 12 Feb 2021:
      - Første præsentation på engelsk af de nye værktøjer til editering af terræn vha. højdekurver.

- Dertil en række webinarer med samme emner på svensk, norsk og finsk.

5.2 Konferencedeltagelse

Grundet COVID-pandemien har mange konferencer i projektets levetid været aflyst eller rykket. Det lykkedes dog at præsentere projektet og dets foreløbige resultater på følgende online konferencer:

- NORDIWA 2021, 5.-7. september: ”New Tool Enables Early Integration of Nature Based Stormwater Solutions in Urban (re)Developments”
- IWA digital 2021, 24. maj – 4. juni: ”SCALGO+NBS: New Tool Enables Early Integration of Nature Based Stormwater Measures in Urban (re)development Projects”

5.3 Artikler i fagblade

Vores arbejde med at udvikle en model, der kan forudsige effekten af LAR-elementer koblet i serie, er dokumenteret i en videnskabelig artikel, udgivet online i det open-acces peer-reviewed tidsskrift Water, med titlen ”Principles for Distributing Infiltration-Based Stormwater Control Measures in Series” (10.3390/w13081029).

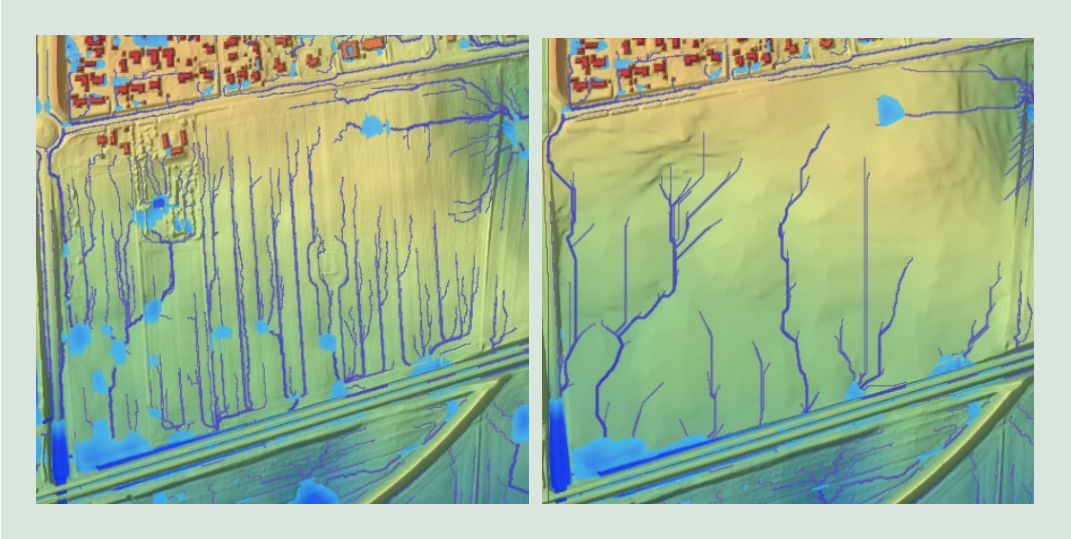
LAR-potentiale værktøjet er dokumenteret i to artikler. Den første er på dansk, målrettet potentielle brugere i Danmark, og indsendt til fagbladet Vand & Jord, med forventet udgivelse i Maj 2022. Den anden er på engelsk, målrettet et internationalt videnskabeligt publikum, og forventes udgivet i et peer-reviewed tidsskrift i løbet af 2022.

De muligheder, SCALGO Live nu tilbyder brugerne ift. design af naturbaserede regnvandsløsninger, bliver løbende præsenteret for eksisterende såvel som potentielle nye kunder i vores marketingsmaterialer, herunder personlige demonstrationer, blogs og brochurer (udover de webinarer der er listet ovenfor). En beskrivelse af vandkunstens arbejde med Hulemarken (se næste afsnit) er også blevet udgivet i et særtillæg om biodiversitet og klimatilpasning, der blev distribueret til medlemmer af foreningen Danske Landskabsarkitekter.

6. Eksempel på anvendelse: Hulemarken

Tegnestuen Vandkunsten, en af slutbrugerrepræsentanterne i projektet, har i den sidste del af projektet arbejdet på en rammelokalplan for et område i udkanten af Ringsted kendt som Hulemarken. Ringsted kommune ønskede at regnvandet i området skulle håndteres på overfladen og bidrage til rekreation og biodiversitet. Tegnestuen har brugt de nye værktøjer i SCALGO Live flittigt i arbejdet, og er meget glade for de nye muligheder det giver dem ift. de muligheder der var i starten af projektet. I det følgende beskrives nogle dele af designprocessen og hvordan SCALGO Live har understøttet dem. Bemærk at rammelokalplanen ikke er endeligt afleveret endnu, og kan nå at ændre sig.

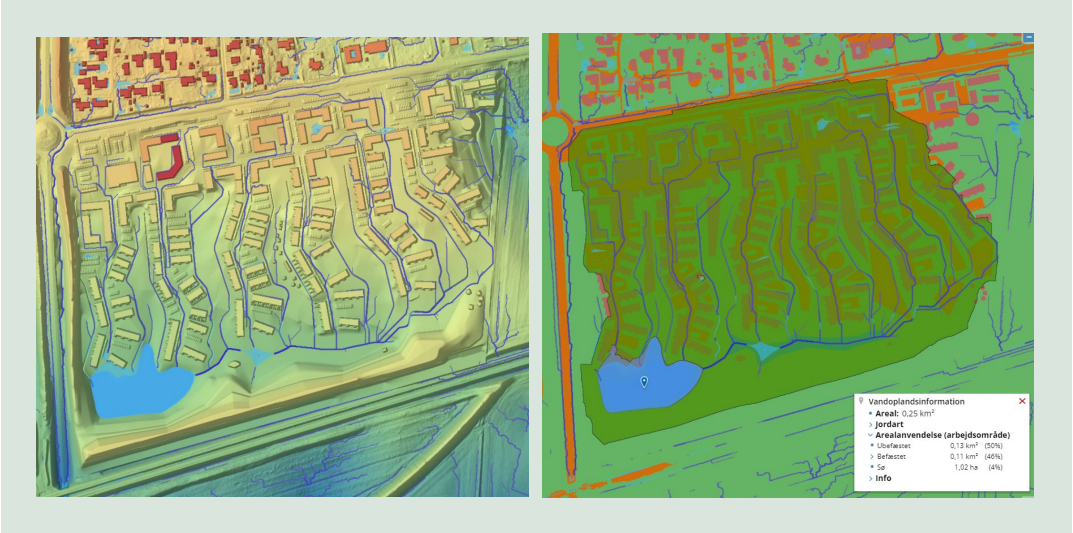
Indledningsvist blev SCALGO Live brugt til at undersøge det oprindelige terræn og de naturlige strømningsveje og lavninger i terrænet. Det oprindelige terræn, i raster format, blev omdannet til højdekurver, som er nemmere for landskabsarkitekter at tolke og bearbejde. Højdekurverne blev udglattet i SCALGO Live, for at fjerne nuværende bygninger, traktorfurer og mindre fordybninger i terrænet, som vil blive fjernet når arealet byggemodnes, og derefter blev de eksporteret fra SCALGO Live i et format der kunne læses ind i tegnestuens tegneprogram, og brugt som grundlag for at skitsere bebyggelsen. Indsigter omkring strømningsveje og naturlige fordybninger indgik i udformning af det overordnede layout for bebyggelsen: de mest egnede arealer, i den sydlige del af området, blev reserveret til regnvandsbassiner, og bebyggelsens struktur blev lagt sådan at adgangsveje og vandveje flugter med hinanden frem for at krydse hinanden. FIGUR 9 nedenfor viser det oprindelig terræn med strømningsveje og lavninger, i den pixelerede version (tv.) og i udglattet version (th.).



FIGUR 9. Udklip fra SCALGO Live: tv. Terrænmodel for Hulemarken i raster-format og med eksisterende bygninger; th. terrænmodel for Hulemarken efter udglatning vha. højdekurver og fjernelse af eksisterende bygninger.

Senere blev SCALGO Live brugt til at designe det naturbaserede regnvandssystem i området. Først blev bebyggelsesplanen importeret ind i SCALGO Live, i form af polygoner for huse, veje, p-pladser, støjvold mm. Herefter blev der tegnet render, grøfter og bassiner ind i

SCALGO Live. Her kom de nye fleksible værktøjer til redigering i terrænet i brug til udformning af naturlige render og bassiner, og oplandskarakteriseringen blev brugt til dimensionering af bassinerne. FIGUR 10 nedenfor viser, hvordan render og grøfter leder vandet til det centrale bassin i områdets sydvestlige hjørne (tv.), og hvordan oplandsværktøjet viser arealet af bassinets opland og dets befæstelsesgrad (oplysninger der skal bruges til nøjagtig dimensionering af bassinet i andre værktøjer) (th.).



FIGUR 10. Udklip fra SCALGO Live: tv. Terrænmodel for Hulemarken efter import af bygningsplan og design af grøfter og bassiner; th. Oplandsværktøjet viser at bassinerne i sydvest samlet vandet fra det meste af boligområdet (med undtagelse af et mindre område mod nordøst der hælder mod øst), og at befæstelsesgraden i området er 46%.

Slutteligt blev SCALGO Live brugt til at vurdere omfanget af oversvømmelser ved en ekstremhændelse (en regn med gentagelsesperiode på 75 år, et krav formuleret af kommunen). Resultatet blev brugt til at indgå i dialog med alle relevante interessenter om tilpasning af rammelokalplanen, så færrest muligt bygninger bliver ramt af oversvømmelser. Her blev muligheden for anvendelse af differentieret afstrømning fra forskellige overfladetyper udnyttet; graden af afstrømning fra de grønne arealer blev afstemt med kommunen på baggrund af lokalt kendskab til jordforholdene.

Vandkunsten fortæller, at de har itereret på designet af rammelokalpanen mange gange, som det ofte er tilfældet i den type af processer, på baggrund af dialog med forskellige interessenter og de indsigter der gøres undervejs. Det har haft stor værdi for dem, at de kunne skifte mellem at arbejde i SCALGO Live og i øvrige tegneprogrammer i denne ”ping pong”, og at de løbende kunne teste idéer til design af regnvandsløsninger af, uden at skulle vente på eksterne ingeniørberegninger.

7. Konklusion

Projektet har succesfuldt udviklet en række nyttige og relevante værktøjer, der understøtter design af naturbaserede regnvandsløsninger. Værktøjerne i SCALGO Live er blevet frigivet løbende, og bliver flittigt benyttet af brugerne. Adskillige webinarer demonstrerer, hvordan udvalgte brugere i både indland og udland anvender værktøjerne ifm. udformning af naturbaserede regnvandsløsninger. LAR-potentiale værktøjet ligger til fri afbenyttelse på klimatilpasning.dk, og er blevet modtaget med interesse fra potentielle brugere. Vi forventer, at værktøjerne vil bidrage til, at fremtidige regnvandsløsninger, både i Danmark og i udlandet, bliver mere naturbaserede og dermed gavner miljøet og menneskers trivsel, via øget biodiversitet og mindsket udslip af drivhusgasser, samt øget udendørs rekreation medførende øget helbred og velvære.

8. Litteratur

Nielsen, K. T.; Moldrup, P.; Thorndahl, S.; Nielsen, J.E.; Uggerby, M.; Rasmussen, M.R.; Field-Scale Monitoring of Urban Green Area Rainfall-Runoff Processes. Journal of Hydrologic Engineering, August 2019; 24 (8) https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001795

Davidsen, S.; Löwe, R.; Ravn, N. H.; Jensen, L. N.; Arnbjerg-Nielsen, K. Initial conditions of urban permeable surfaces in rainfall-runoff models using Horton's infiltration. Water Science and Technology, 2018; 77(3), 662–669. https://doi.org/10.2166/wst.2017.580

Resumé
Formålet med projektet har været at skabe et digitalt værktøj for design af naturbaserede regnvandsløsninger: et værktøj som er enkelt og hurtigt at anvende, og samtidig giver pålidelige og relevante svar på de vigtigste spørgsmål, der stilles i de tidlige designfaser. Resultatet fra projektet er en række værktøjer, der er nyttige hver for sig, og kan tilmed kombineres i et workflow der dækker stort set alle relevante behov ifm. tidlig design af naturbaserede regnvandssystemer. De værktøjer, der er tilgængelige i SCALGO Live, inkluderer:

- Oplandskarakterisering: et opland, der bidrager med overflade-afstrømning til en regnvandsløsning, beskrives nu ikke kun med størrelse, men også med fordeling af befæstelsestyper og jordarter.

- Fleksibel redigering i terræn: værktøjerne til at ændre i terrænet og forme det til naturbaserede regnvandsløsninger, er øget fra en række simple værktøjer baserede på firkantede elementer, til at inkludere variable skråningsanlæg og afrundede elementer baseret på avanceret højdekurveteknologi.

- Realistisk afstrømning: brugerne kan nu vælge variable for realistisk afstrømning fra forskellige typer overflader, baseret på de indbyggede oplysninger om befæstelse og jordarter, og baseret på avancerede simuleringer af nedbørsafhængig afstrømning fra forskellige typer jord. de vigtigste spørgsmål, der stilles i de tidlige designfaser.

Miljøstyrelsen
Lerchesgade 35
5000 Odense C

www.mst.dk