

Kandidatspeciale

Analyse og dimensionering af permeable belægninger som
LAR løsninger i Hjørring Midtby



7. Marts 2024



Frederik Gylendorf Nielsen

AALBORG UNIVERSITY
STUDENT REPORT



AALBORG UNIVERSITY
STUDENT REPORT

Department of the Built Environment,
Water and Environmental Engineering
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst
<https://www.byggeri.aau.dk/>

Titel:

Analyse og dimensionering af permeable belægninger som LAR løsninger i Hjørring Midtby

Projekt:

Speciale i Vand og Miljø

Projekt periode:

1. September 2022 - 7. Marts 2024

Medvirkende:

Frederik Gylendorf Nielsen

Vejledere:

Søren Liedtke Thorndahl

Antal sider: 50

Afsluttet: 7/3/2024

Abstract:

By setting up a model of the sewage system in Hjørring midtby, and using precipitation data from a gauge 30 kilometers east of the project area, different types of permeable pavement are tested. The three types included in this project is Permeable Interlocking Concrete Pavers, PICP, Concrete Grid Pavers, CGP and Pervious Concrete, PC. The infiltration rate of the three solutions are found and is implemented in the MIKE Urban model of the project area. The precipitation input to the model is calculated using different climate factors, to make sure that the solution is viable 100 years into the future. The infiltration rate of the permeable pavement decide how much water bypasses the sewage system and it is simulated how much water ends up in the system and the water level in the system. To determine the most optimal solution, a cost-benefit analysis is carried out, to test whether or not a solution is economically viable. As a result of the simulations and the cost-benefit analysis, it is concluded which permeable pavement is the most efficient.

Forord

Denne rapport er resultatet af et kandidatspecialeprojekt gennemført af Frederik Gylendorf Nielsen i løbet af 3. og 4. semester af kandidatuddannelsen Vand og Miljø på Aalborg Universitet. Specialeprojektet er udført i perioden 1. september 2022 til 7. Marts 2024.

Specialet var som udgangspunkt skrevet i samarbejde med Sweco, som efter nogle måneder måtte forlade projektet, på baggrund af omorganisering af medarbejdere, og vejleder Søren Liedtke Thorndahl fra Aalborg universitet. Herfor skal der lyde en tak for god vejledning og feedback til de nævnte personer.

Projektet tager udgangspunkt i et område beliggende ved Jernbanegade og Svinget i Hjørring Midtby. Opgavebeskrivelsen er stillet af Sweco, der ønskede at aflede regnvandet og undgå oversvømmelser af omkringliggende byggerier.

Læsevejledning

Rapporten er inddelt i 10 kapitler, der tilsammen går ind og undersøger løsningsforslag til håndtering af estimerede fremtidige regnhændelser i Hjørring Midtby. Kapitel 1 introducerer de effekter klimaforandringer og stigende temperaturer kan have på regnhændelser i Danmark. I kapitel 2 introduceres der et område i Hjørring Midtby, hvor det er vurderet at der vil opstå store problemer i takt med de stigende intense regnhændelser. Kapitel 3 introducerer projektets problemformulering. Kapitel 3-6 introducerer de metoder og modeller der bruges til at finde projektets løsningsforslag. I kapitel 7 findes de forskellige løsningsforslag, hvor de beskrives og analyseres. Kapitel 8 indeholder en diskussion af disse løsningsforslag og kapitel 9 konkluderer på hvilke forslag der vil være mest favorable i dette område. Til sidst, i kapital 10, findes en perspektivering til en anden spændende løsning, som bliver beskrevet. Appendix A indeholder rådata fra modellen og Appendix B indeholder bearbejdet data.

I forbindelse med referencer benyttes der i denne rapport Harvard-metoden.

Frederik Gylendorf Nielsen

Indhold

1	Introduktion - Effekten af klimaforandring	1
2	Introduktion af projektområde	3
2.1	Projektområde - Hjørring Midtby	3
3	Problemformulering	6
3.1	Problemstillinger	6
4	Regnserie	7
5	MIKE Model	8
6	Løsningsforslag	11
6.1	Løsningsforslag	11
6.2	Implementering af permeabel belægning	13
6.3	Sammenligning af permeable belægninger	15
7	Resultatbehandling	21
7.1	Modelresultater	22
7.2	Cost-benefit analyse	25
8	Diskussion	27
9	Konklusion	29
10	Perspektivering	30
	Litteratur	31
A	Modelresultater	33
A.1	Udledning	33
A.2	Vandniveau	37
B	Sammenligning af permeable belægninger	41
B.1	Udledning	41
B.2	Vandniveau	43

1 Introduktion - Effekten af klimaforandring

En konsekvens af klimaforandringer og stigende temperaturer er at vores regnhændelser kan blive mere intense. Dette sker, da det potentielle vandindhold i luften bliver højere i takt med temperaturen. Det betyder ikke nødvendigvis at den samlede nedbørsmængde bliver øget, men at regnhændelserne kan blive mere intense og med længere tid mellem hændelserne. I Danmark er den årlige nedbør steget med 150 mm siden 1874 [Cappelen, 2013]. I fremtiden forventes det at temperaturstigninger resulterer i tørkeperioder om sommeren med perioder af højintense regnhændelser, og om vinteren forventes det at den samlede regnmængde stiger med temperaturen.

Disse ændringer i regnforholdene medfører betydelige udfordringer. Eksempelvis udgør disse intense regnhændelser en udfordring, da jorden bliver mættet, hvilket kan resultere i oversvømmelser. Disse oversvømmelser kan påvirke trafikssikkerheden og forsage ejendomsskade. Derudover kan de længere tørkeperioder mellem regnhændelserne besværliggøre aktiviteterne for landbruget, da rødderne ikke kan optage de nødvendige næringsstoffer. De større regnintensiteter kan også være problematisk, da de store nedbørsmængder transporterer næringsstofferne dybere ned i jorden. [Trenberth, 2011] Yderligere er områder med fælles kloakering også ekstra udsat, da der her kan ske opstuvning til terræn fra ledningsnettet, hvilket kan udgøre en sundhedsrisiko for beboerne i de berørte områder.

Ifølge [for Rådgivende Ingeniører, 2020] var gennemsnitsalderen for et kloaksystem 33-35 år i år 2020. Dette betyder at en stor del af kloaksystemerne i Danmark ikke har kapacitet til at håndtere de stigende regnintensiteter. Derved skal kloaksystemerne i mange byområder omlægges, så de kan følge med den stigende regnmængde. Mange kommuner har her et ønske om at kunne aflede vandet ved hjælp af Lokal Afledning af Regnvand, LAR, da det er billigere og er mindre belastende på ledningsnettet.

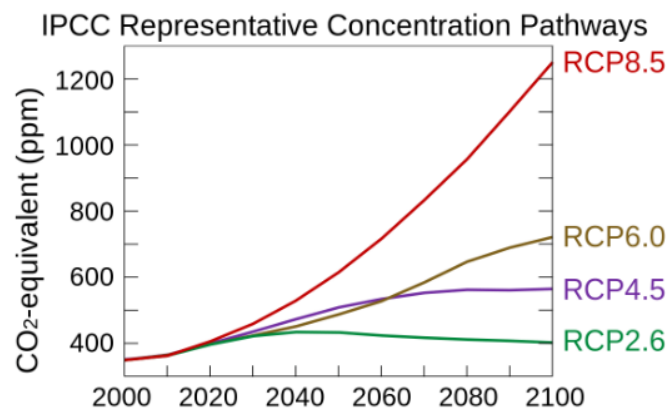
Til at estimere effekten af klimaforandringer, bruges ofte Representative Concentration Pathways, også kaldt RCP-scenarierne. RCP-scenarierne anvendes til at vurdere fremtidige koncentrationer af drivhusgasser i atmosfæren frem mod år 2100. RCP er opdelt i fire kategorier, der hver beskriver forskellige veje koncentrationerne kan gå baseret på økonomiske, sociale og fysiske ændringer i vores miljø. De fire kategorier kan ses herunder.

- RCP8.5
- RCP6.0
- RCP4.5

- RCP2.6/RCP3-PD

RCP-tallet refererer til strålingspåvirkningen i W/m^2 i år 2100. Strålingspåvirkning refererer her til mængden af stråling, primært solstråling, der trænger ind i atmosfæren i forhold til den mængde, der forlader atmosfæren.

Ved hjælp af disse scenarier, kan man altså undersøge en mulig fremtid for forskellige parametre, dette kunne for eksempel være for CO_2 niveauet eller temperaturen i fremtiden. Et eksempel er for temperaturen der for RCP2.6 og RCP8.0 steget med henholdsvis $1,0^\circ$ og $3,7^\circ$ i år 2100.[Olesen et al., 2014] Et andet eksempel er på udviklingen af CO_2 koncentrationen i atmosfæren, hvilket kan ses på figur 1.1.



Figur 1.1. Udvikling af RCP

Figuren viser altså tydeligt forskellen på de forskellige scenarier. Det ses at RCP8.5-scenariet er et scenarie hvor man forventer en stor stigning i drivhusgasser, mens at man fx i RCP2.6-scenariet forventer at koncentrationen vil opnå et maks, og herefter vil det stille falde lidt igen.

Disse RCP-scenarier bruges også især i projekteringen af nye kloaksystemer. Når et kloaksystem skal dimensioneres, er det, i Danmark, anbefalet at dimensionere med en tidshorisont på 100 år. For at tage højde for klimaforandringer, bruges der i Danmark klimafaktorer, der er et estimat for hvor meget nedbøren ændrer sig over tid. Som udgangspunkt bruges en klimafaktor på 1,1, hvilket svarer til et stigning på 30 % på 100 år. Alternativt kan man udregne en klimafaktor baseret på en historisk regnserie.

2 Introduktion af projektområde

Som [for Rådgivende Ingeniører, 2020] beskrev i deres rapport skal kloaksystemerne i mange byområder renoveres, så de kan håndtere nutidige og fremtidige regnhændelser. Derfor er det fra Miljøstyrelsens side vedtaget, at alle kommuner i Danmark skal udarbejde en spildevandsplan. Denne skal indeholde et kort over kommunernes kloaksystemer, planer om renovering af eksisterende ledninger, samt planer om håndtering og rensning af både regn- og spildevand. Dette skal udarbejdes i en tidsplan. [Miljøstyrelsen, 1999]

Et sted hvor det er nødvendigt at finde nye løsninger på regnvandshåndtering er i Hjørring. Hjørring midtby er nemlig jævnligt ramt af oversvømmelser, der resulterer i ejendomsskade. Netop herfor vil nærværende projekt have til formål at kigge på løsningsforslag til kloaksystemet i Hjørring, så det kan håndtere højintense regnhændelser, med mindst mulig skade på personer og ejendomme.

2.1 Projektområde - Hjørring Midtby

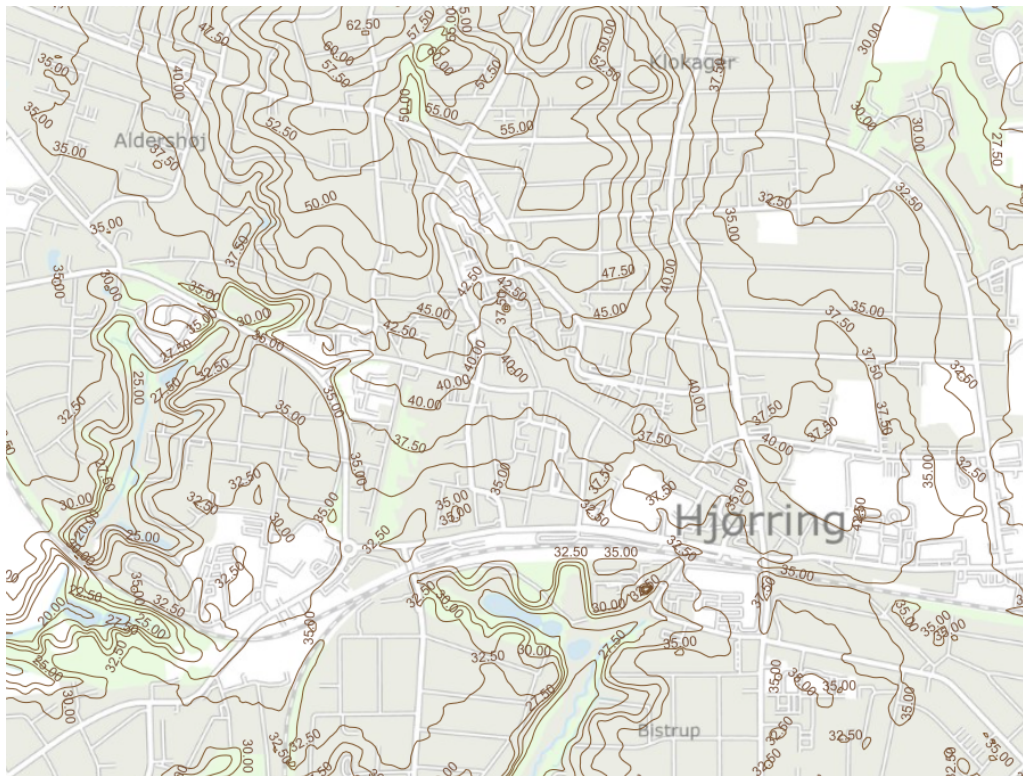
Hjørring er en by i Danmark med 25.644 indbyggere [Statistik, 2022]. Den ligger i den nordlige del af Jylland som er illustreret på figur 2.1.



*Figur 2.1.*Placering af Hjørring

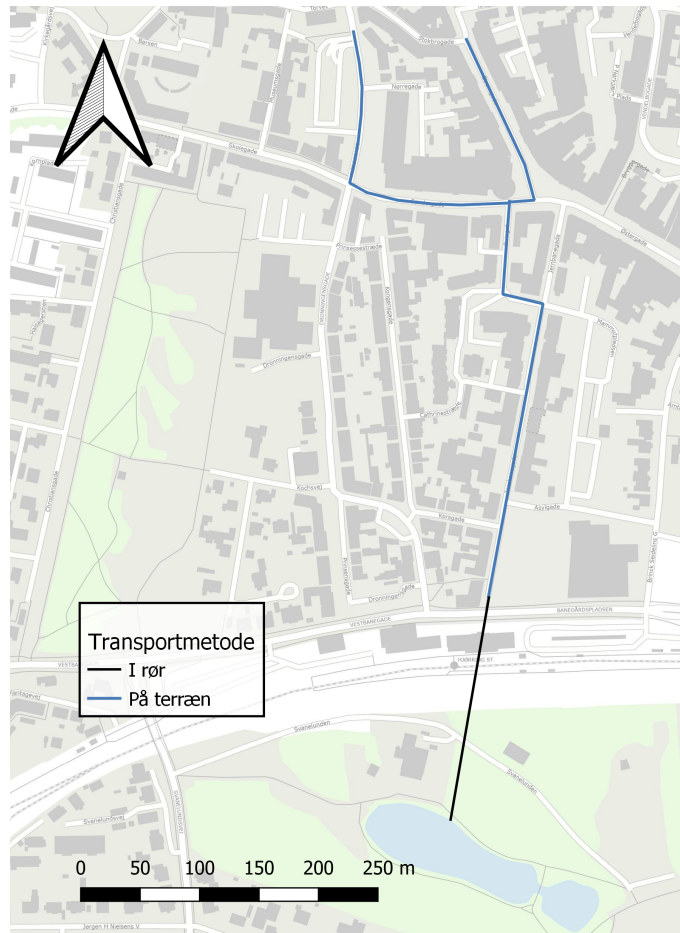
Omdrejningspunktet i dette projekt vil være midtbyen og gågaden i Hjørring, hvor der skal findes en løsning med LAR, og det skal sikres at vandet ledes til en recipient med tilstrækkelig kapacitet. Dette betyder at der ved vejene omkring gågaden skal der findes en løsning, for ikke at oversvømme det nærliggende bebyggelse.

For at vurdere hvilken strømretning nedbøren vil have, skal der kigger på topografien i området. Et kotekort over område i Hjørring kan ses på figur 2.2, hvor det ses at der er faldende kote mod syd.



Figur 2.2.Kotekort over Hjørring Midtby

Det er ønsket fra kommunen at lede vandet via Jernbanegade. Jernbanegade er en gågade, der antages ikke at blive benyttet ved højintense regnhændelser. Det er illustreret på figur 2.3 hvilken rute det ønskes at vandet skal tage.



Figur 2.3. Vandets rute fra Midtby til recipient

Udover jernbanegade, så er det også nødvendigt at lede vandet via gaden ”Svinget”. Dette kommer til at forårsage et momentumskift i vandets strømning, da det først skal dreje 90 grader øst, hvorefter det skal 90 grader syd. Netop disse sving er en udfordring, da det forventes at der vil større regnhændelser vil strømme vand ind i de omkringliggende bygninger, hvis der ikke findes en løsning der leder vandet med rundt i disse to 90 graders sving. Netop herfor vil dette projekt undersøge det ene af disse sving, for at undgå komplikationer med de nærliggende bygninger.

3 Problemformulering

Projektet formål er at klimatilpasse en del af gågaden i Hjørring Midtby, så der forekommer færre hændelser med vand på terræn. Hertil skal der undersøges en historisk regnhændelse og vurdere klimafaktorer, så midtbyen kan fremtidssikres mod større regnhændelser. Derudover skal området undersøges, for at bestemme hvilken løsning er bedst til området. Ved at opbygge en model over området, kan der ved hjælp af en regnserie, vurderes den nuværende problematik og hvordan en løsning kan findes, så området er klimasikret 100 år ud i fremtiden.

Dette har ledt til følgende problemformulering.

Ved at modellere området i MIKE Urban, kan en model blive opbygget, så der kan beregnes på hvilken løsning er mest effektiv i håndteringen af regnvand i området. Dertil skal det vurderes hvilken løsning der bedst kan betale sig økonomisk.

Hvilken løsning kan findes, for at sikre at reducere mængden af nedbør, der skal håndteres af ledningsnettet i Hjørring Midtby for at undgå oversvømmelser?

Hvilken LAR løsning er mest effektiv for at aflede regnvandet og hvilken løsning kan bedst betale sig økonomisk?

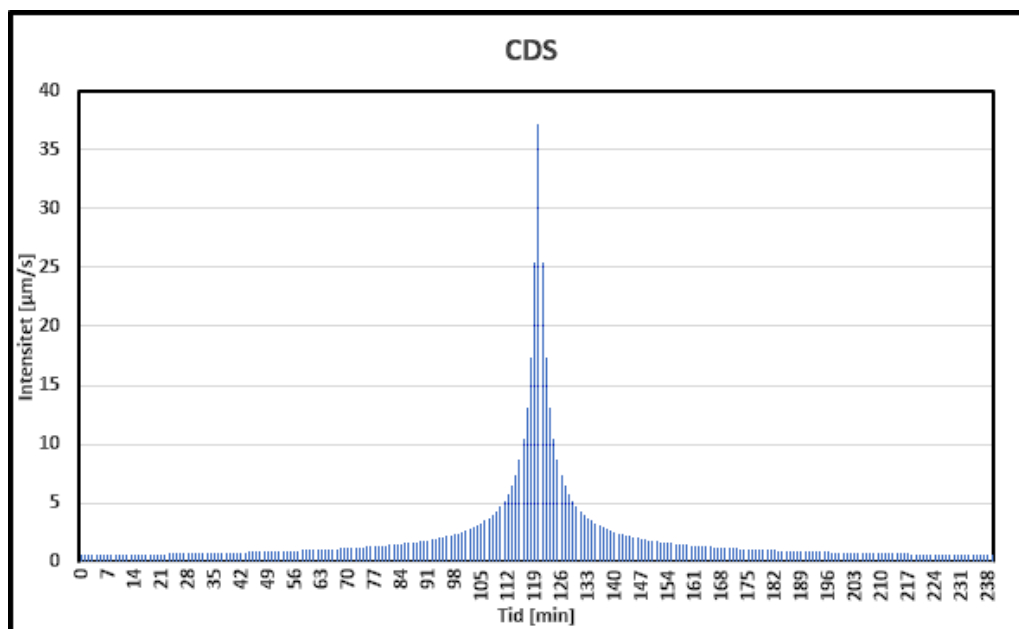
3.1 Problemstillinger

For at besvare problemformuleringen, er følgende arbejds spørgsmål stillet.

- Ved at benytte klimafaktorer for at dimensionere afløbssystemet, hvilken løsning kan findes, så Hjørring Midtby er sikret 100 år frem?
- Ved at opsætte en model i MIKE Urban, kan det bestemmes, hvilken LAR løsning der er mest optimal til projektområdet?
- Kan regnvandet blive ledt udenom ledningsnettet, så det ikke skal håndtere store mængder nedbør?
- Hvilken løsning kan bedst betale sig økonomisk?

4 Regnserie

For at dimensionere regnvandssystemet i Hjørring, skal nedbørsmængden estimeres. Dette gøres ved at finde regndata fra et nærtliggende område, og benytte det som input til modellen. Der er fundet en regnhændelse fra SVK station 20097, Frederikshavn Materielgård, da der ikke var tilgængelig data fra Hjørring. Frederikshavn Materielgård ligger i samme breddegrad, omkring 30 kilometer øst for Hjørring. Regnserien er omdannet til en Chicago Design Storm, CDS-Regn for at nedsætte beregningstider på modellen.



*Figur 4.1.*CDS regn af Frederikshavn Materielgård

Herefter skal regnserien fremskrives, så kloaksystemet kan håndtere nedbørsforholdene i op til 100 år. Spildevandskomiteens Skrift 30 anbefaler klimafaktorer, der kan ses i tabel 4.1 [Spildevandskomiteen, 2014].

Gentagelsesperiode	Standard	Høj
2-års hændelse	1,20	1,45
10-års hændelse	1,30	1,70
100-års hændelse	1,40	2,00

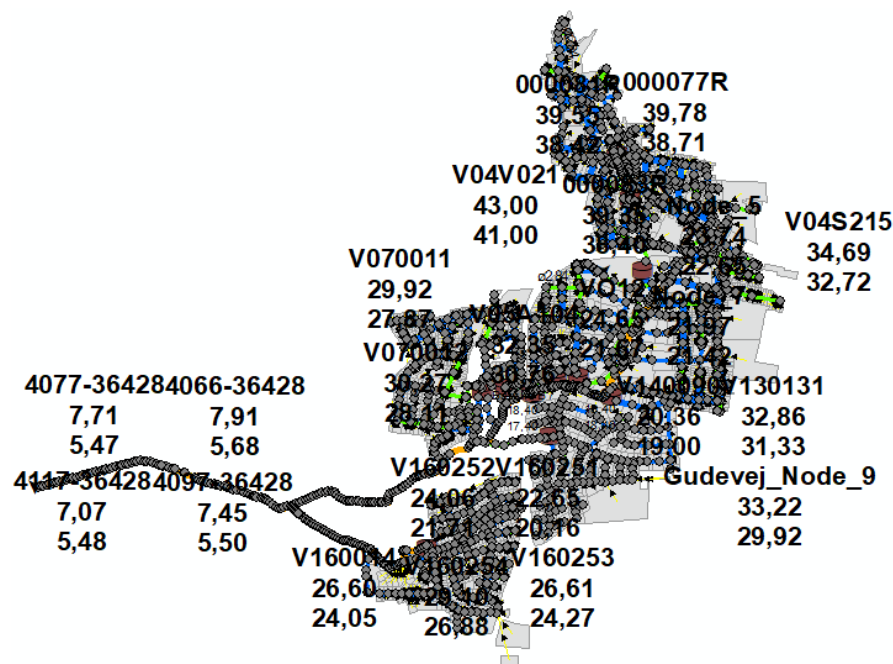
*Tabel 4.1.*Klimafaktorer ved 100 års horisont.

Denne regnserie implementeres i MIKE Urban for at undersøge afløbssystemet ved disse regnforhold. Herefter skal det testes, hvorvidt løsningsforslagene forbedrer kloaksystemet, så opstuvning kan forebygges så vidt muligt.

5 MIKE Model

MIKE Urban er et program, der er udarbejdet af Dansk Hydraulisk Institut, DHI og er opbygget ved hjælp af MOUSE-modellen (Modelling of Urban Sewers), der ved hjælp af en hydrologisk og en hydrodynamisk model kan beregne på hvor meget af nedbøren, der ender udenfor afløbssystemet.

MIKE Urban modellen der er brugt i dette projekt er udarbejdet af SWECO A/S, som har stillet den til rådighed til projektet. Det er en rørmodel af Hjørring midtby, der skal afspejle virkeligheden og bør indeholde korrekte mål og hældninger på rørsystemet. En oversigt over modellen er vist på figur 5.1.

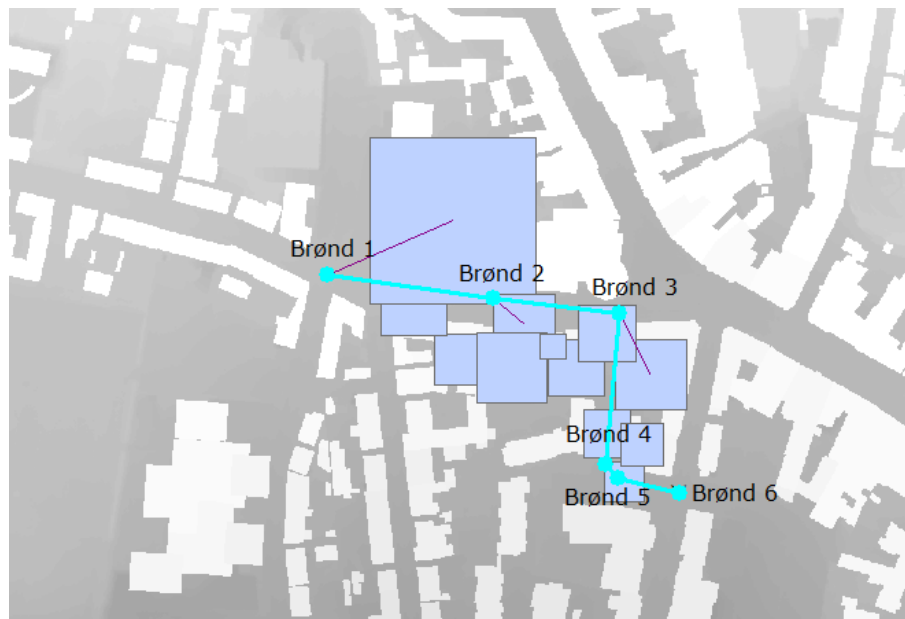


Figur 5.1. Oversigt over MIKE Urban model udleveret af SWECO

Herefter skal der indsættes en regnserie, der vil indikere hvor overløbsproblemer kan fremkomme. Modellen kalibreres med virkelige data for oversvømmelser, for at sikre at den præsenterer virkelighedsnære resultater. Det kan derefter bruges til at påpege problematikker i afløbssystemet og simulere løsningsforslag til problematikkerne.

En regnserie skal bruges som input til modellen, der er her benyttet en historisk regn fra Frederikshavn, som blev beskrevet i kapitel 4. Ved at simulere en historisk regn kan svagheder i afløbssystemet samt eventuelle oversvømmelser på overfladen findes.

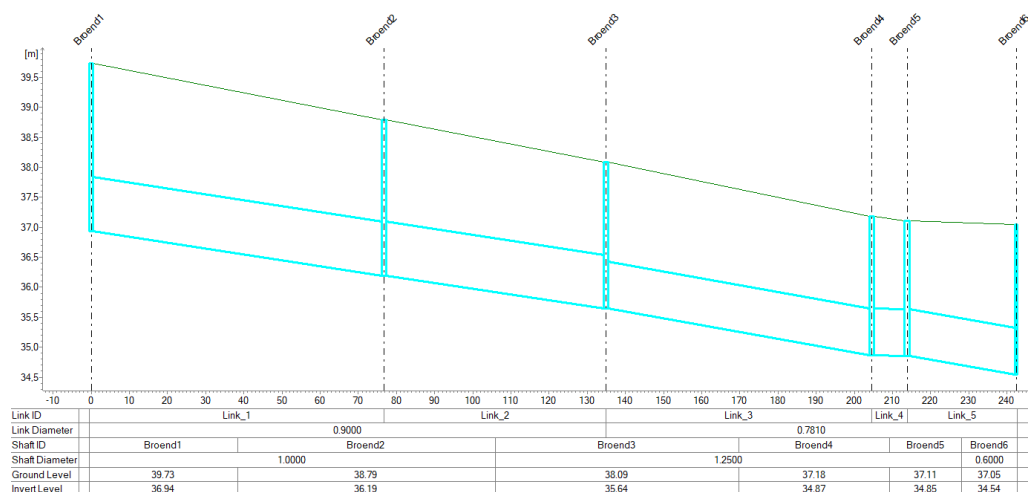
Modellen udarbejdet af SWECO indeholder hele ledningsnettet i Hjørring. For at overskueliggøre modellen, er kun den relevante ledningsstrækning blevet eksporteret. Denne ledningsstrækning er vist på figur 5.2



Figur 5.2. Oversigt over ledningsnettet med tilhørende oplände

Udover ledningsstrækningen viser figur 5.2 også de brønde der er på ledningsstrækningen og de dertilhørende oplände. Opländene der er vist på figuren er målt og taget fra den oprindelige MIKE Urban model. Befæstelsesgraden fra den oprindelige model er benyttet, da opländene er simplificeret i den nye model og derfor ikke repræsenterer opländene præcist.

Ledningsstrækningen er faldende henover hele ledningstykket, hvilket også fremgår af figur 5.3.



Figur 5.3. Tværsnit over ledningsstrækningen, der er relevant for problemstillingen

For at undersøge de eksisterende forhold i projektområdet, er der lavet en runoff simulering

med modeltypen T-A Curve (A), med et fastsat tidsskridt på 60 sekunder. Da CDS regnen har en varighed på 240 minutter, bliver simuleringen foretaget med 240 tidsskridt.

Resultatet for runoff simuleringen bliver input til en dynamic wave netværks simulering, der kobler hele ledningsnettet sammen og viser udledning og vandniveau i alle brønde i systemet.

Denne model kan bruges til at vurdere effektiviteten af løsningsforslagene, for at finde den løsning, der skåner afløbssystemet mest.

6 Løsningsforslag

For at bestemme en endelig løsning der vælges, skal der kigges på forskellige løsningsforslag. Miljøafdelingen i Hjørring kommune anbefaler at løsningen enten indeholder afledning af vandet i form af render, grøfter eller ved nedsivning på permeable overflader. Dette projekt vil fokusere på løsninger med permeable overflader, da denne løsning er ideel for områder med stor andel af fortove. Bæreevnen i permeable belægninger, er som udgangspunkt ikke ret god, hvilket betyder at det er optimalt at implementere på fortove, da disse ikke oplever hyppig tung trafik. Derfor vil løsningsforslag med dette fokus tages i betragtning i dette projekt.

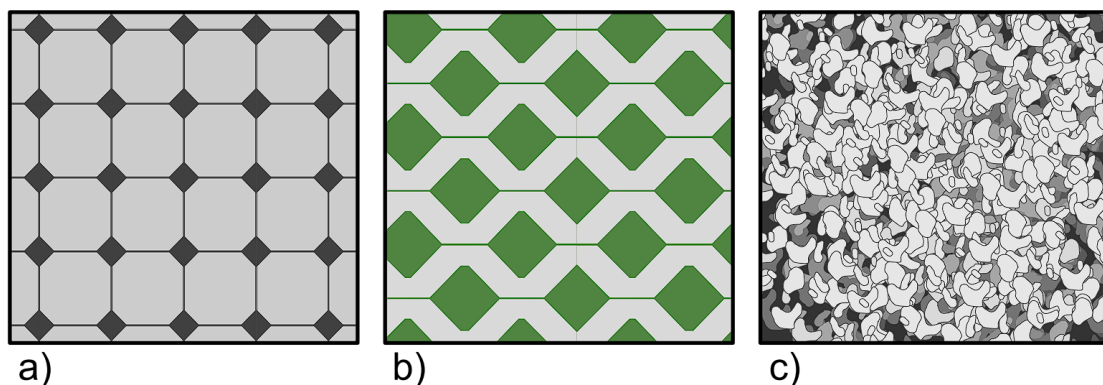
6.1 Løsningsforslag

Permeabel belægning er et underlag med mulighed for afløb gennem overfladen, dette medvirker at der er mindre vand på overfladen, der ophobes på overfladen eller kan oversvømme kloak- og ledningsnettet. Problemet ved at lave permeable veje, er at der er mindre bæreevne i belægningen, da det kræver at der er porer gennem vejprofilet. Dette er derfor en god løsning ved fortove, der ikke oplever den samme belastning fra tunge køretøjer.

For at implementere permeable belægninger i MIKE modellen, skal infiltrationsraten kendes. Faktorer som eksempelvis materialets porøsitet, jordens kompositionen under overfladen og hvilken type permeabel belægning der benyttes.

6.1.1 Bestemmelse af permeabel belægning

For at finde infiltrationsraten skal typen af permeabel belægning findes. Denne vurdering er lavet på baggrund af [Bean et al., 2007], som har undersøgt 40 forskellige steder med permeable belægninger, for at bestemme infiltrationsraten og effekten af de forskellige typer. Som udgangspunkt findes der tre forskellige typer som vist på Figur 6.1.



Figur 6.1.a) PICP, b) CGP og c) PC

Type a) er kendt som Permeable Interlocking Concrete Pavers, PICP, og består af fliser der er lagt med mellemrum, for at have bedre nedsivningsmuligheder. Nedsivningen afhænger af størrelsen på mellemrummene, men antages at være 9 % af det samlede areal.

Type b) er på dansk kendt som græsarmering, men vil i dette projekt kendes som Concrete Grid Pavers, CGP og kan både bestå af beton eller plastik, hvilket hjælper med at bevare jordens struktur, så bæreevnen forbliver tilstrækkelig. For bedre bæreevne bruges beton, hvilket vurderes til at have et nedsivningsareal på omtrent 30 %. Denne type ses ofte i forbindelse med parkeringspladser.

Type c) er porøs beton hvilket kaldes Porous/Pervious Concrete, PC, som er et betonunderlag, hvor de fineste af kornene er fjernet fra cementen, hvilket betyder at der er større porer, der giver mulighed for nedsivning gennem betonlaget. Dette vil bevare en stor del af bæreevnen, men vil ikke være fordelagtigt at benytte ved tung trafik. Derudover kan porerne blive tilstoppet af partikler fra dæk og sedimenter, hvilket kræver yderligere rensning af belægningen.

På vejen i projektområdet kører tung trafik med vareindlevering, hvilket betyder at de tre løsninger ikke vil være attraktive, da bæreevnen vurderes for dårlig ved tung trafik. Det er derfor besluttet at løsningen kommer til udelukkende at benyttes på fortovet. Ud fra resultaterne fundet i [Bean et al., 2007] kan det ses at den gennemsnitlige infiltrationsrate for de tre typer belægning er som vist i Tabel 6.1.

Type af belægning	CGP	PICP	PC
Maksimum infiltrationsrate [mm/t]	320	2000	270
Minimum infiltrationsrate [mm/t]	16	16	110
Gennemsnitlig infiltrationsrate [mm/t]	130	530	160

Tabel 6.1.Infiltrationsrater uden opretholdning af belægninger.

Både PICP og PC havde markant højere infiltrationsrater hvis man fjernede alle fine partikler og ikke tog det øverste jordlag i betragtning. Men ved jordlag med dårlig infiltrationsrate, var det dimensionsgivende for alle tre belægningstyper. Både PICP og PC kræver meget vedligeholdelse for at undgå tilstopning i porerne. Derved skal det højtrykssenses når infiltrationsraten bliver forværret. Der er et eksponentiel fald i

infiltrationsraten, så hvis porerne begynder at tilstoppes, skal det renses hurtigst muligt. Til gengæld kan infiltrationsraten af GCP blive højere, hvis man vælger en mindre armering og et større græsareal i opbygningen. Hvis det udelukkende skal bruges til fortov, er bæreevnen ikke et problem, da der er tilstrækkelig bæreevne til fodgængere. Dermed kan infiltrationsarealet øges, så den mest optimale infiltration findes, mens bæreevnen forbliver tilstrækkelig. Effekten af infiltrationsarealet vil blive undersøgt nærmere ved hjælp af MIKE Urban og det vil blive dimensioneret, så bæreevnen er acceptabel.

6.2 Implementering af permeabel belægning

For at implementere en løsning på projektområdet, er det nødvendigt at finde data på områdets størrelse, topografi og øvrige informationer om området. Derudover er det nødvendigt at lave en økonomisk vurdering i form af en cost-benefit analyse, da den økonomiske del vil have stor betydelse for de kommuner, i dette tilfælde Hjørring, der investerer i klimatilpasning.

6.2.1 Svinget

For at bestemme hvor meget nedbør der påvirker afløbssystemet, skal det bestemmes hvor stort projektområdet er. Der skal derudover findes informationer om befæstelsesgraden, der beskriver hvor stor en del af overfladen, hvorfra nedbøren løber i afløbssystemet. Det drejer sig om alle områder, der ikke kan nedsive regnvand. Oplandene som vist i Tabel 6.2 er de oplande der hører til hver brønd i modellen. Disse arealer vil blive brugt til at bestemme mængden af nedbør der falder til hver brønd.

Opland	Tilslutning	Befæstelsesgrad [%]	Samlet areal [ha]	Befæstet areal [ha]
Opland 1	Brønd 1	73,72	0,583	0,429788
Opland 2	Brønd 2	100	0,091	0,091
Opland 3	Brønd 2	100	0,081	0,081
Opland 4	Brønd 2	63,31	0,053	0,033554
Opland 5	Brønd 2	90,36	0,103	0,093071
Opland 6	Brønd 3	69,53	0,106	0,073702
Opland 7	Brønd 3	61,05	0,067	0,040904
Opland 8	Brønd 3	72,12	0,014	0,010097
Opland 9	Brønd 3	100	0,069	0,069
Opland 10	Brønd 4	100	0,048	0,048
Opland 11	Brønd 4	100	0,034	0,034
Opland 12	Brønd 4	96,54	0,038	0,036685

Tabel 6.2. Oprindelige oplande for projektområdet

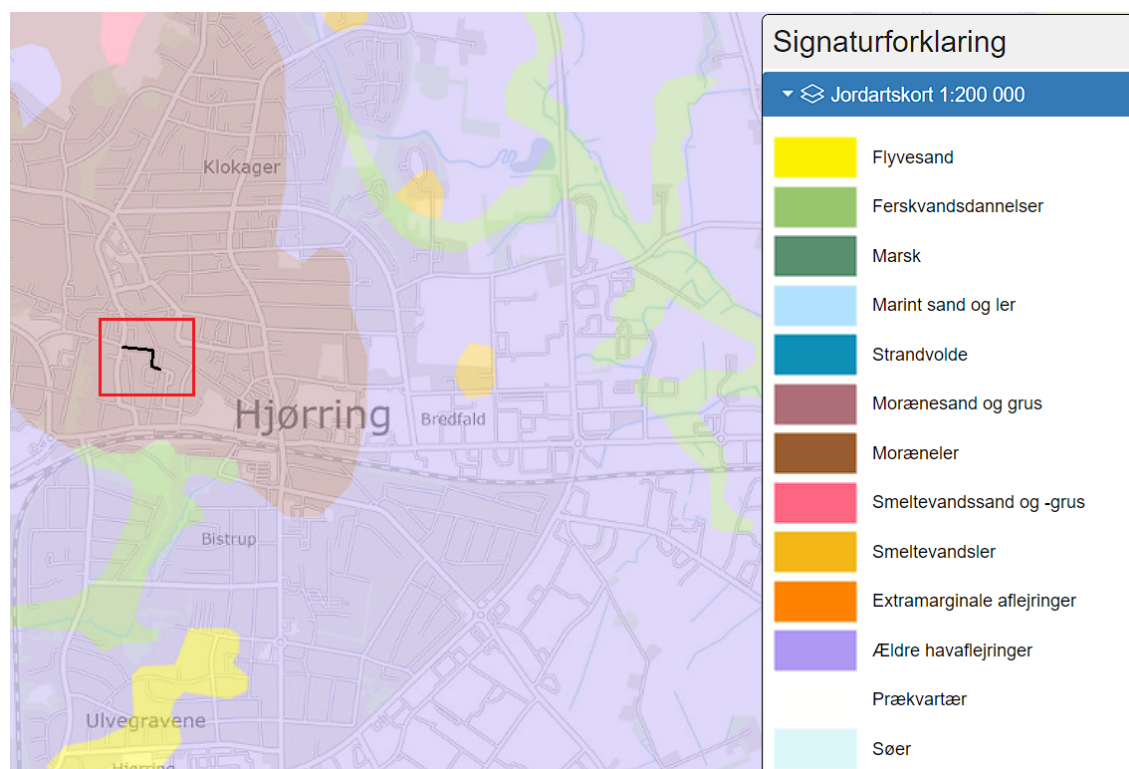
For at justere befæstelsesgraderne, bliver arealet af fortov målt til hver brønd, da løsningsforslagene vil medføre infiltration på en andel af fortovsarealet. Derudover vil de brønde med flere oplande, samles som et stort opland for at give et bedre billede af hvor meget belastning hver brønd udsættes for. Arealerne kan findes i tabel 6.3.

Brønd	Samlet areal [ha]	Befæstet areal [ha]	Fortov areal [ha]
Brønd 1	0,583	0,0938	0,3359876
Brønd 2	0,328	0,035269	0,2633561
Brønd 3	0,256	0,02875	0,1649521
Brønd 4	0,12	0,041971	0,0767142
Brønd 5	0	0	0
Brønd 6	0	0	0

Tabel 6.3. Relevante arealer for projektområdet

Da der planlægges at implementere permeable belægninger i projektområdet, skal det befæstede areal ændres, da fortovene ikke længere vil betegnes som 100 % befæstede. Udgangspunktet bliver figur 6.1, hvor der er henholdsvis 9%, 30 % og 100 % infiltration for PICP, CGP og PC. Derved skal der udregnes hvor meget af hvert opland, er bestående af fortov, for at bestemme en endelig befæstelsesgrad.

Ud fra GEUS' Jupiter portal, kan der findes jordartskort, der beskriver hvilke geotekniske forhold der findes i området. I Hjørring består de øverste jordlag primært af Morænesand og -grus, som set på figur 6.2, hvilket betyder at infiltrationen gennem de øverste jordlag er høj.



Figur 6.2. Jordartskort over Hjørring. Projektområdet vist med sort og markeret med rød firkant.

Den hydrauliske ledningsevne for de forskellige jordarter kan ses på tabel 6.4.

Jordart	Hydraulisk ledningsevne, k [m/s]
Grus	$5 \cdot 10^{-3}$
Groft sand	10^{-3}
Mellemkornet sand	$5 \cdot 10^{-4}$
Ret fint sand	10^{-4}
Fint sand	$5 \cdot 10^{-5}$
Finsand	$2 \cdot 10^{-5}$
Grovsilt	10^{-5}
Silt	10^{-5}
Moræneler	10^{-5} til 10^{-7}
Kalk	10^{-3} til 10^{-5}

Tabel 6.4.Hydraulisk ledningsevne for jordarter [Ovesen et al., 2009]

Den hydrauliske ledningsevne for sand og grus antages at være lig med groft sand, hvilket ud fra tabel 6.4 kan aflæses til 10^{-3} og er den hastighed vandet bevæger sig ned gennem jordsøjlen, hvis det udelukkende er bestående af groft sand. Dette er næsten aldrig tilfældet, da der mange steder er lerlag længere nede i jordsøjlen, hvilket har en lav hydraulisk ledningsevne. I forbindelse med vandafledning er dette ikke ret relevant, så længe de øverste metre har høj hydraulisk ledningsevne, så de øverste jordlag kan fungere som et forsinkelsesbassin, indtil vandet kan infiltrere de tættere jordlag. Der kan opstå problemer hvis sand- og gruslaget er vandmættet, så den dimensionsgivende ledningsevne findes i et andet jordlag. Derimod hjælper opstuvet vand på infiltrationen, da højden af vandspejlet afgør hvor meget kraft vandet bliver trykket ned med.

For at bestemme en specifik hydraulisk ledningsevne for projektområdet, kunne der foretages laboratorietest af jordprøver fra området. Dette vil naturligvis ikke være præcist, da der er stor variation i jorden og der skal derfor analyseres mange prøver, for at få brugbare resultater.

Hvis der regnes med en hydrauliske ledningsevne på 10^{-3} m/s, svarer det til 3600 mm/t, denne infiltrationsrate er dermed den dimensionsgivende og den der skal bestræbes efter at overgå, for ikke at forsinke infiltrationen af vandet.

6.3 Sammenligning af permeable belægninger

Som nævnt i afsnit 6.1.1 er der i dette projekt sat fokus på tre forskellige permeable belægninger:

- Permeable Interlocking Concrete Pavers, PICP
- Concrete Grid Pavers, CGP
- Porous Concrete, PC

6.3.1 Permeable Interlocking Concrete Pavers, PICP

Denne løsning består af impermeable fliser, dog med mellemrum der udgør cirka 9% af det samlede areal. Mellemrummene er fyldt med småsten, hvilket har en meget høj infiltrationsrate. Da det er småsten, der udgør mellemrummene, kan det antages at der er 100 % infiltration i mellemrummene, da infiltrationsraten er højere end det

underliggende jordlag. Derved bliver udregningen for infiltration forholdvis simpel, men arealet skal omregnes, da al nedbøren skal infiltrere på 9 % af arealet. Dette betyder at ved fortovsarealet, fundet i tabel 6.3 skal ganges med 0,09 for at finde infiltrationsarealet.

6.3.2 Concrete Grid Pavers, CGP

I denne løsning er der valgt at benytte CGP, hvilket på dansk omtales græsarmering. Denne løsning benyttes som oftest ved parkeringspladser, da der er behov for høj infiltrering. I denne løsning er det antaget at 30 % af det samlede areal består af græs, hvorfor befæstelsesgraden er 70 %. Derfor skal det udregnes om infiltrationen gennem jordlaget er tilstrækkelig høj til at al nedbør kan infiltrere gennem græsarealet. Herved bruges infiltrationen for morænesand og -grus, der i afsnit 6.2.1 blev udregnet til 3600 mm/t.

6.3.3 Porous/Pervious Concrete, PC

Almindeligvis består beton af sand, sten og en limblanding af cement og vand. Derudover kan andre der være andre tilsætningsstoffer, som eksempelvis flyveaske, microsilica og kalkfiller. Kvaliteten og styrken af beton afhænger af blandingsforholdene og hvilken type cement der bruges. Her har XL-byg lavet en tabel over de mest optimale blandingsforhold til forskellige konstruktionstyper, med brug af cement fra Aalborg Portland [XL-byg, 2024].

Beton med BASIS®, RAPID® eller AALBORG WHITE® cement	Blandingsforhold efter rumfang		Forbrug pr. m³ beton				For- ventet tryk- styrke MPa
Anvendelse	Cement: Sand: Sten	Cement: støbe- mix	Cement kg	Sand m³	Sten m³	Støbe- mix m³	
Betongulve udsat for kraftigt slid. Gulve i stier og båse. Vægge og gulve udsat for vandtryk. Udendørs belægninger.	1:1, 5:2, 5	1:3,5	350	0,5	0,8	1,1	40
Betongulve med alm. slid. Udendørs konstruktioner.	1:2:3	1:4	290	0,5	0,8	1,1	30
Gulve til lettere færdsel. Underbeton til slidlag, klinker o.l. Indendørskonstruktioner.	1:2, 5:3, 5	1:5	240	0,6	0,8	1,2	25
Fundamenter i større bygninger. Udstøbning i fundaments- blokke.	1:2:4	1:6	210	0,6	0,8	1,2	20
Fundamenter til parcelhuse.	1:3, 5:5	1:7	175	0,6	0,8	1,2	12
Klaplæg, renselæg.	1:4:6	1:8	155	0,6	0,8	1,2	8

*Figur 6.3.*Blandingsforhold for beton ved diverse konstruktioner [XL-byg, 2024]

I almindelig beton ønskes der ikke at være infiltration gennem overfladen, hvilket betyder at mængden af sand i blandingen er forholdsvis høj. Ud fra tabellen på figur 6.3 kan det ses at "Udendørs konstruktioner" anbefaler et blandingsforhold på 1:2:3, hvilket betyder at betonblandingen består af en del cement, to dele sand og 3 dele sten. Derudover har betonen en forventet trykstyrke på 30 MPa.

PC kan have samme indhold som almindeligt beton, men for at gøre infiltrationen højere, skal koncentrationen af sand mindskes. Dette vil påvirke bæreevnen, men bæreevnen for et fortov behøver ikke nødvendigvis at være ret høj, da det ikke bliver belastet i samme grad som en vej.

For at bestemme infiltration og bæreevne som en funktion af sandindhold i betonen tages udgangspunkt i [Manan et al., 2018]. I denne videnskabelige artikel har de fundet et forhold mellem sandindholdet, bæreevne og infiltration. Der er taget udgangspunkt i et 1:1,68:2,63 forhold, hvilket som udgangspunkt giver en lavere trykstyrke, da indholdet af sand og sten er lavere.

Udregning af trykstyrke som funktion af sandindhold

Deres forsøg med bæreevne, forudsætter at sandindholdet bliver reduceret med 10% for hver betonprøve og at trykstyrken bliver målt for henholdsvis 7 og 28 dage.

Ved hjælp af dette forsøg kan trykstyrken som funktion af sandindholdet vises som en tendenslinje gennem forsøgene. I Manan et al. [2018] er der lavet tre prøver for hver ændring i sandindholdet. Derfor bliver udregningerne foretaget på gennemsnittet af trykstyrken af de tre. I Tabel 6.5 og 6.6 er M100 en kontrolprøve af ikke-reduceret beton, hvilket bliver udgangspunktet for ændringen. Derudover er M90 en betonprøve med 90% af den originale sandmængde, M80 en betonprøve med 80% af den originale sandmængde og så fremdeles.

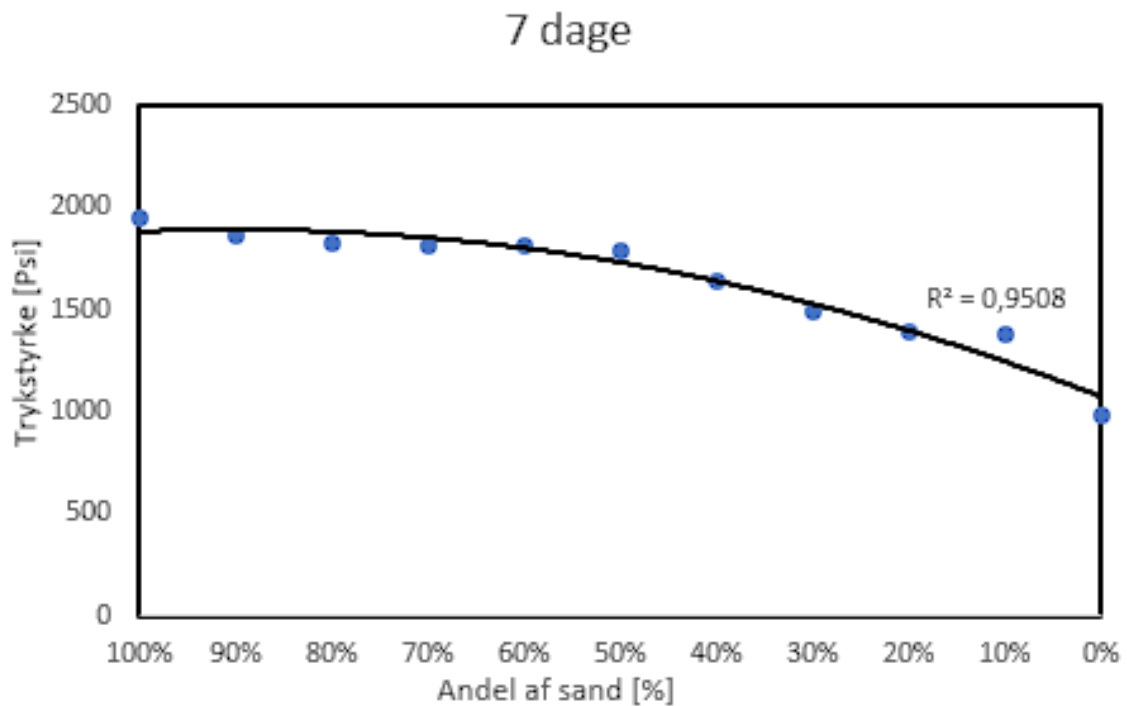
7-dage	Gennemsnit [Psi]	Ændring i trykstyrke [%]
M100	1947,8	0
M90	1862,4	-4,384434
M80	1823,9	-6,361023
M70	1818,7	-6,627991
M60	1808,3	-7,161926
M50	1787,6	-8,224664
M40	1642,9	-15,65356
M30	1489,1	-23,54965
M20	1394,1	-28,42694
M10	1379,5	-29,17651
M0	977,4	-49,82031

Tabel 6.5. Ændring i trykstyrke som funktion af sandindhold [Manan et al., 2018].

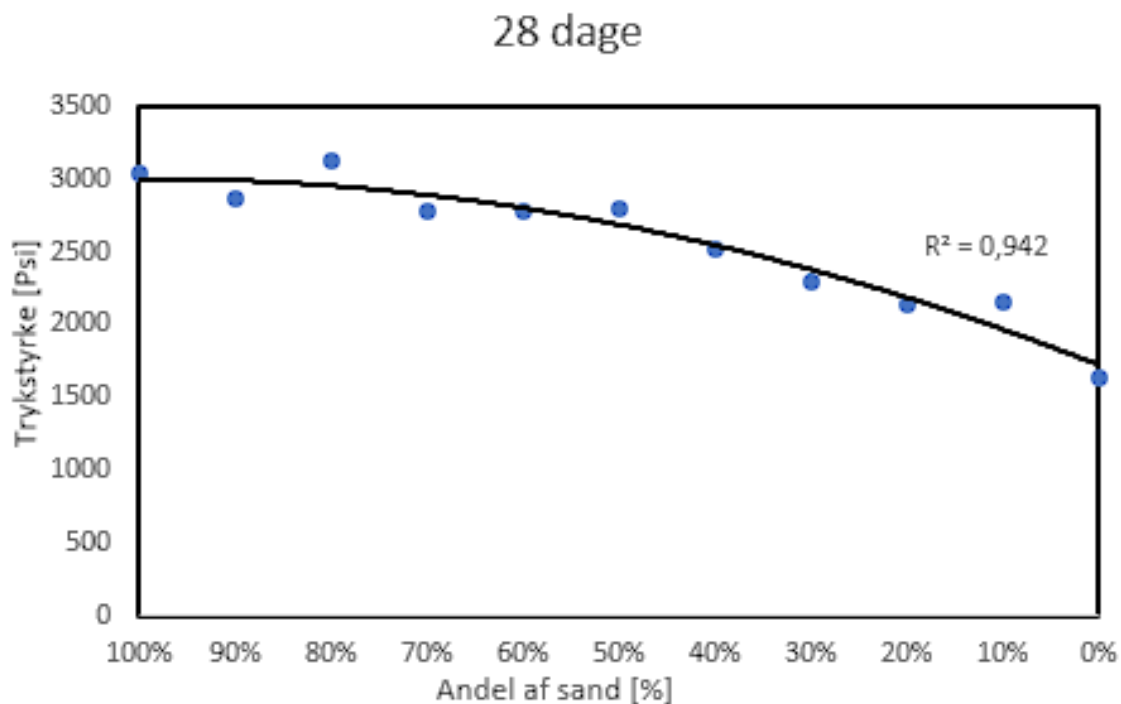
28-dage	Gennemsnit [Psi]	Ændring i trykstyrke [%]
M100	3047,7	0
M90	2865,22	-5,987466
M80	3123,66	2,49237
M70	2788,12	-8,517243
M60	2782,03	-8,717065
M50	2795,33	-8,280671
M40	2527,58	-17,06598
M30	2290,98	-24,82922
M20	2144,83	-29,62463
M10	2150,83	-29,42777
M0	1638,17	-46,24897

Tabel 6.6. Ændring i trykstyrke som funktion af sandindhold [Manan et al., 2018].

Ud fra Tabel 6.5 og 6.6 kan det ses at ved begge forsøg bliver trykstyrken næsten halveret ved betonblandingen, der indeholder 0% sand. På Figur 6.4 og 6.5 bliver dervalt en polynomisk tendenslinje, da dataen ikke er helt tydelig og derved opnås en R^2 -værdi på henholdsvis 0,9508 og 0,942. Dermed kan det antages at der er en forholdsvis stærk sammenhæng mellem sandindhold og trykstyrke.



Figur 6.4. Graf over trykstyrken med en polynomisk tendenslinje [Manan et al., 2018].



Figur 6.5. Graf over trykstyrken med en polynomisk tendenslinje [Manan et al., 2018].

Det antages at forholdet mellem sandindhold og trykstyrke er gældende og derfor kan trykstyrken af 1:2:3 betonblandingen bestemmes ud fra disse. Derudover er trykstyrken i [Manan et al., 2018] opgivet i Psi, mens trykstyrken for den gældende betonblanding er opgivet i Pascal. 1 Psi er svarende til 6,8 KPa.

Andel af sand [%]	7 dage [MPa]	28 dage [MPa]
100	30	30
90	28,68467	28,20376
80	28,09169	30,74771
70	28,0116	27,44483
60	27,85142	27,38488
50	27,5326	27,5158
40	25,30393	24,8802
30	22,93511	22,55124
20	21,47192	21,11261
10	21,24705	21,17167
0	15,05391	16,12531

Tabel 6.7. Ændring i trykstyrke som funktion af sandindhold for betonblanding med 30 MPa.

I tabel 6.7 er trykstyrken bestemt ved forskellige betonblandinger med varierende sandindhold ud fra tendensen fundet i [Manan et al., 2018]. Dermed kan det vurderes om bæreevnen er tilstrækkelig, når infiltrationsraten er bestemt.

Udregning af infiltration som funktion af sandindhold

Infiltrationsraten er i [Manan et al., 2018] fundet ud fra forsøg, hvor der er brugt en infiltrationsring. 40 lb vand, hvilket er svarende til 18,14 liter, hvis densiteten er antaget til 1 g/mL, er placeret i ringen. Derefter måles det, hvor lang tid det tager, at infiltrere gennem betonen. Infiltrationsraten er i [Manan et al., 2018] angivet som vist i ligning 6.3.3.

$$I = \frac{K \cdot M}{D^2 \cdot T}$$

hvor,

I	Overflade infiltrationsrate	[mm/min]
K	126.780 (For SI enheder er denne $4,58 \cdot 10^9$)	[inch-pound]
M	Masse af infiltreret vand = 40 lb	[lb]
D^2	Indvendig diameter af infiltrationsringen	[-]
T	Tid det tager vandmassen at infiltrere betonen	[sek]

Efter forsøgene kendes tiden, T , som indsættes i ligningen for at finde den samlede infiltration.

Andel af sand [%]	T [sek]	I [in/t]	I [cm/t]	I [mm/t]
100	-	-		
90	-	-		
80	-	-		
70	-	-		
60	-	-		
50	101	348,92	886,2568	8862,568
40	78	451,81	1147,597	11475,97
30	64	550,65	1398,651	13986,51
20	43	819,57	2081,708	20817,08
10	38	927,41	2355,621	23556,21
0	27	1301,87	3306,75	33067,5

Tabel 6.8. Infiltration som funktion af sandindhold [Manan et al., 2018]

For et sandindhold på mere end 50 %, er infiltrationen så langsom at det ikke kan beskrives som PC. Ved højere end 50 % reducere af sandindholdet, begynder der at infiltrere vand ved en forholdsvis høj hastighed. Som vist i Afsnit 6.2.1 er infiltrationsraten antaget at være 3600 mm/t, hvilket er lavere end 50 % i Tabel 6.8, hvilket betyder at betonen ikke vil være dimensionsgivende. Derved kan det antages at en beton med 50 % reducere af sandindholdet kan bruges som permeabel belægning. Ifølge tabel 6.7 vil trykstyrken være et sted mellem 27,52 - 27,53 MPa, hvilket er en ændring i trykstyrken på 8,22 - 8,27 %. Der antages at være tilstrækkelig bæreevne til at håndtere fodgængere, samt biler, hvis dæk kommer op på fortovet.

7 Resultatbehandling

Ved hjælp af MIKE Urban er rørmodellen blevet simuleret ved forskellige scenarier, for at vurdere effekten af løsningsforslagene. Der er lavet en model af det eksisterende afløbssystem for at bestemme et udgangspunkt for ændringerne. Derved kan det lettere vurderes hvilket effekt de foretagne ændringer har på systemet.

For at bestemme mængden af regn der skal håndteres i systemet, er der bestemt en regnserie som input til modellen. Dette er beskrevet i kapitel 4, hvor det er bestemt at bruge en CDS regn med klimafaktorer rangerende fra 1,2 til 2. Derudover er det vigtigt at kende størrelserne på oplandene, samt befæstelsesgraden, for at bestemme hvor stort et område der leder vand til de respektive brønde.

I tabel 7.1 kan informationer om oplandene findes.

Opland	Areal [ha]	Befæstelsesgrad [%]	Befæstet areal [ha]
Opland_2229_2	0,583	73,72	0,430
Opland_2998	0,091	100	0,091
Opland_3159	0,081	100	0,081
Opland_4266	0,053	63,31	0,034
Opland_4269	0,103	90,36	0,093
Opland_3505_2	0,106	69,53	0,074
Opland_4267	0,067	61,05	0,041
Opland_4468	0,014	72,12	0,010
Opland_3158	0,069	100	0,069
Opland_3137	0,048	100	0,048
Opland_3138	0,034	100	0,034
Opland_3506_1	0,038	96,54	0,037
Total	1,287	-	1,041

Tabel 7.1. Arealer og befæstelsesgrader for oplandene der påvirker ledningsnettet

De tre typer permeabel belægning er blevet implementeret på fortovet i modellen og har givet følgende befæstelsesgrader, der kan findes i tabel 7.2

Opland	Oprindelig [ha]	PICP [ha]	CGP [ha]	PC [ha]
Opland_2229_2	0,430	0,421	0,402	0,336
Opland_2998	0,091	0,090	0,088	0,080
Opland_3159	0,081	0,079	0,074	0,056
Opland_4266	0,034	0,034	0,034	0,034
Opland_4269	0,093	0,093	0,093	0,093
Opland_3505_2	0,074	0,073	0,071	0,063
Opland_4267	0,041	0,039	0,034	0,016
Opland_4468	0,010	0,010	0,010	0,010
Opland_3158	0,069	0,069	0,069	0,069
Opland_3137	0,048	0,047	0,044	0,035
Opland_3138	0,034	0,031	0,025	0,005
Opland_3506_1	0,037	0,037	0,037	0,037
Total	1,041	1,022	0,979	0,835

Tabel 7.2. Befæstede arealer for udgangspunktet og de tre løsningsforslag

De befæstede arealer er fundet på baggrund af typen af permeabel belægning. Fortovsarealer er blevet målt og den samlede befæstningsgrad er tilpasset til hver af løsningsforslagene. Dette gøres, da infiltrationen i de tre løsningsforslag er forskellige og derved ændres infiltrationsarealet.

For at tilpasse de forskellige klimafaktorer, som nævnt i kapitel 4 er der lavet seks simuleringer af hver belægning, samt for den oprindelige situation. Det betyder at der er testet for 24 scenarier, hvor belægning og klimafaktor er de parametre der ændres på.

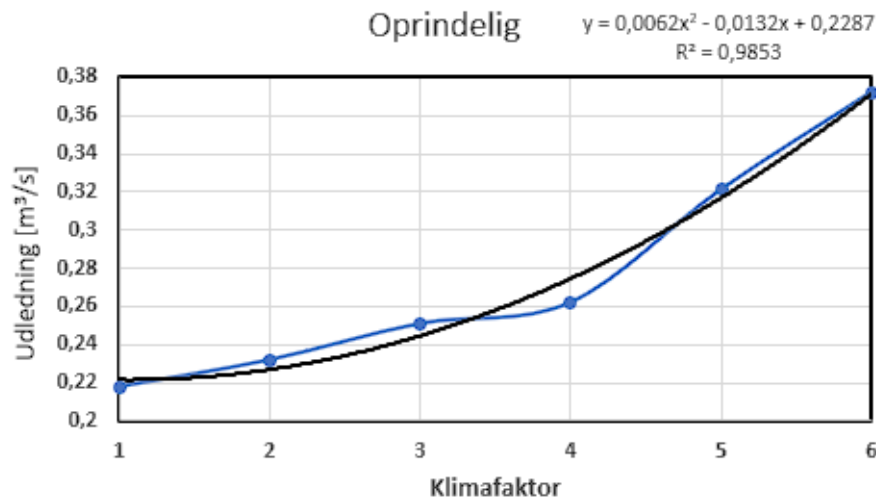
Klimafaktor	Oprindelig [%]	PICP [%]	CGP [%]	PC [%]
1,20	0	9	30	100
1,30	0	9	30	100
1,40	0	9	30	100
1,45	0	9	30	100
1,70	0	9	30	100
2,00	0	9	30	100

Tabel 7.3. De 24 scenarier der er simuleret. Den oprindelige er udgangspunktet inden permeabel belægning. PICP er med 9% infiltration, CGP er med 30 % infiltration og PC er med 100% infiltration i fortovsarealet.

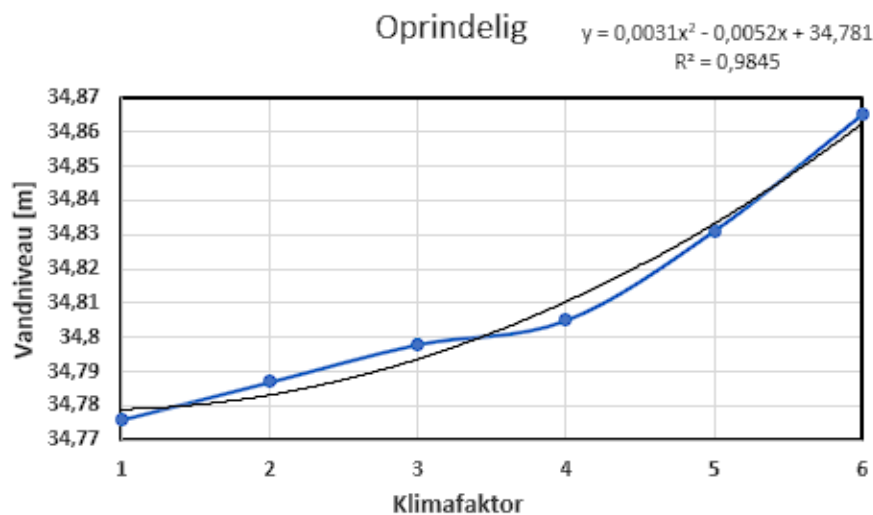
Ved at simulere de 24 scenarier, kan vandniveauet i ledningsnettet, samt udledningen ved enden af ledningsstykket give et billede af effekten ved at implementere permeable belægninger på projektområdet.

7.1 Modelresultater

Da det er en CDS-regn der bruges til simuleringerne, vil målingerne blive foretaget i den mest kritiske del, hvilket finder sted efter 120 minutter i den 240 minutter lange regnserie. Den oprindelige status uden permeable belægninger bliver udgangspunktet for ændring i systemet. De oprindelige værdier for udledning og vandniveau er målt i den sidste brønd i ledningsstykket, Brønd 6, og kan ses på figur 7.1 og 7.2



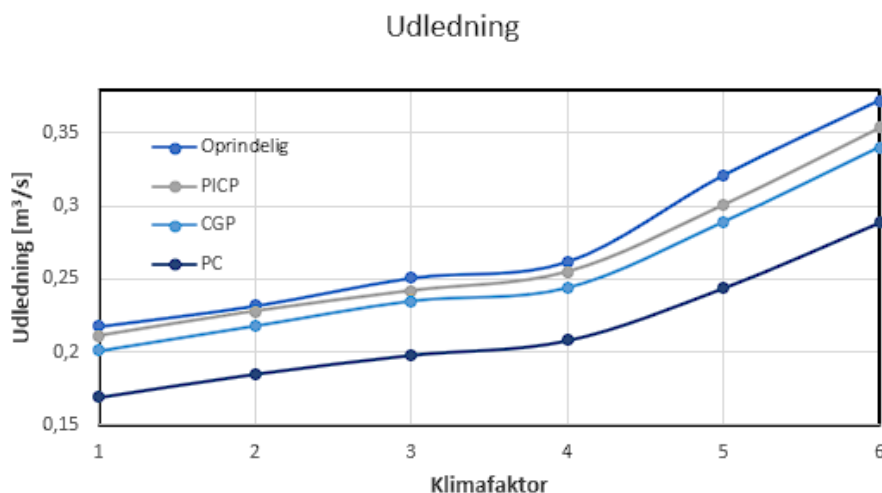
Figur 7.1. Udledning ved Brønd 6 uden permeabel belægning.



Figur 7.2. Vandniveau i Brønd 6 uden permeabel belægning.

Vandniveauet i brønden er i dette tilfælde ikke over topkoten i brønden. Der er undersøgt for alle brøndene i ledningsnettet, men ingen af dem er problematiske. Det vil sige at ingen af scenarierne forårsager opstuvning på terræn. Dette antages at være en fejl ved den udleverede model fra SWECO, da det vil betyde at der ikke er et problem. Der er rapporter om oversvømmelser i forbindelse med regnhændelser i netop projektområdet, derfor antages det at problematikken er reel og at data fra modellen er fejlagtig. Derved må det vurderes på baggrund af forbedringer af vandniveau og udledning, da det er med til at fortælle om ledningsnettets input fra overfladen. Jo lavere vandniveau og udledning, jo mere vand infiltrerer og forbipasserer ledningsnettet.

Ved at sammenligne udledningsværdierne for de fire belægningstyper, kan det beregnes, hvor stor en effekt de forskellige løsningsforslag har på mængden af regnvand i ledningsnettet. Igen er der taget udgangspunkt i Brønd 6 og resultaterne kan ses på figur 7.3



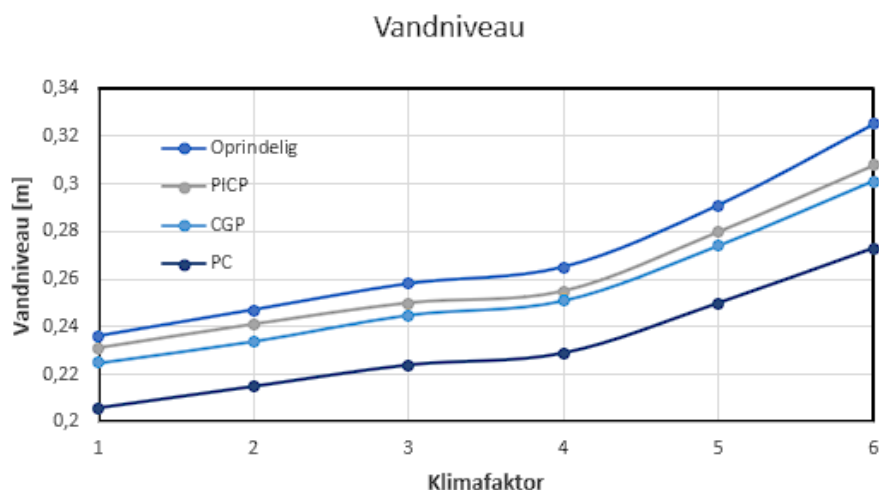
Figur 7.3.Sammenligning af udledning ved de fire belægningstyper.

Tabel 7.4 viser reduktion af udledning ved de tre belægningstyper i relation til den oprindelige løsning.

Belægning	KF1,2	KF1,3	KF1,4	KF1,45	KF1,70	KF2,00
PICP	3,21	1,72	3,59	2,67	6,23	7,33
CGP	7,80	6,03	6,37	6,87	9,97	10,99
PC	22,48	20,26	21,12	20,61	23,99	24,35

Tabel 7.4.Reduktion af udledning i procent fra Brønd 6 som funktion af belægningstype ved varierende klimafaktor.

Herefter kan vandniveauet i brønden plottes, hvilket er vist på figur 7.4.



Figur 7.4.Sammenligning af vandniveau i Brønd 6 ved de fire belægningstyper.

Tabel 7.5 viser reduktionen i vandniveau ved de tre belægningstyper.

Belægning	KF1,2	KF1,3	KF1,4	KF1,45	KF1,70	KF2,00
PICP	2,12	2,43	3,10	3,77	3,78	5,23
CGP	4,66	5,26	5,04	5,28	5,84	7,38
PC	12,71	12,96	13,18	13,58	14,09	16,00

Tabel 7.5. Reduktion af vandniveau i procent i Brønd 6 som funktion af belægningstype ved varierende klimafaktor.

Det ses på figur 7.3 og 7.4 at det er en ens tendens ved vandniveau og udledning, hvilket giver god mening, da der ifølge modellen ikke er opstuvning af vand og derved kan det vand der er i systemet, ledes ud.

Det ses i tabel 7.4 og 7.5 at reduktionen er størst ved PC, da infiltrationsarealet er størst. Det var forventet, da en forøgelse af infiltration vil medføre at en mindre vandmængde skal håndteres af ledningsnettet.

7.2 Cost-benefit analyse

For at kunne vurdere hvilket løsningsforslag der er mest optimalt, skal der laves en cost-benefit analyse. Dette gøres ved at beregne omkostningerne ved implementering af løsningsforslagene og materialepriser. Det samlede fortovsareal i projektområdet er 1.997,9 m^2 . Derved kan der på baggrund af resultaterne i forrige afsnit, konkluderes på hvilket løsning der er bedst for netop Hjørring Midtby. Da det er et klimatilpasningsprojekt, vil der ikke blive sammenlignet med omkostninger i forbindelse med oversvømming i den nuværende situation, da det sjældent kan betale sig økonomisk. Kommunen har valgt at tilpasse sig et bestemt niveau af klimasikring, hvilket betyder at de er villige til at betale for at borgerne er tilfredse med løsningen.

PICP består af almindelige fliser, der er forskudt. Ifølge [og Have Service, 2024] koster betonfliser 125 kr. per kvadratmeter. Fliserne lægges forskudt, så der er 9% infiltration, hvilket betyder at 9 % af det samlede fortovsareal skal fratrækkes i dette tilfælde. Prisen for det samlede fortovsareal vil i dette tilfælde blive 227.261 kr. Her tillægges 100.000 kr. for mandetimer til at lægge fliserne, da det ikke er inkluderet i prisen på fliserne.

Ved CGP er fliser med 40 % græsareal blevet fundet og koster 144,11 kr. per flise [FCbeton, 2024]. Der skal 11 fliser per kvadratmeter, hvilket løber op i 3.167.091 kr. for det samlede fortovsareal. Det skal tilføjes at det ikke er med belægning inkluderet. Også her tillægges 100.000 kroner til mandetimer.

Ifølge [IBF, 2024] er en løsning med permeabel asfalt omkring 15 % dyrere end en løsning med almindelig asfalt. Priser for almindeligt asfalt er fundet på [A/S, 2024] og angiver at 40 m^2 asfalt koster 10.700 kr at lægge. Det vil sige at 1.997,9 m^2 asfalt koster 534.438 kr. Hvis permeabel asfalt er 15 % dyrere, løber det op i 614.604 kr. for det samlede fortovsareal. Det antages at prisen for PC er omtrent den samme.

En oversigt over priserne kan ses i tabel 7.6.

Belægning	Pris i kr.
PICP	327.261
CGP	3.267.091
PC	614.604

Tabel 7.6.Priser ved de tre løsningsforslag

For at vurdere hvilken løsning er den bedste i dette tilfælde er det blevet beregnet hvor meget prisen bliver ud fra reduktion af udledning og vandniveau. Det bliver vurderet som en pris per procentpoints reduktion i de to kategorier, ud fra gennemsnittet af resultaterne med de seks klimafaktorer. Dette kan findes i 7.7 og 7.8.

Belægning	Pris [kr.]	Procent reduktion	Pris per procent reduktion
PICP	327.261	4,12	79.327
CGP	3.267.091	8,01	408.038
PC	614.604	22,13	27.769

Tabel 7.7.Pris for løsningsforslag som funktion af reduktion i udledning.

Belægning	Pris [kr.]	Procent reduktion	Pris per procent reduktion
PICP	327.261	3,41	96.098
CGP	3.267.091	5,58	585.631
PC	614.604	13,75	44.688

Tabel 7.8.Pris for løsningsforslag som funktion af reduktion i vandniveau.

8 Diskussion

For at undersøge de tre løsningsforslag blev en model opbygget i MIKE Urban. Den oprindelige model, som er udviklet af SWECO, indeholder topologi og ledningsnet for Hjørring Midtby. Da modellen først blev testet, var det utallige fejl og mangler, der gjorde det umuligt at fortsætte med at arbejde i den oprindelige model. Derfor blev der taget et ledningsstykke ud af den oprindelige model, hvilket også medførte øget beregningshastighed for den relevante del af projektområdet. Dette ledningsstykke blev indsat i en ny MIKE Urban model, hvor relevante data fra den oprindelige model blev implementeret. Dermed kunne en regnserie påføres modellen, så det var muligt at analysere løsningsforslagenes indvirkning på det eksisterende afløbssystem.

Regnserien der blev benyttet var målestation Frederikshavn Materielgård st. nr. 20097, da det blev antaget at være repræsentativ for nedbøren i Hjørring Midtby, da det ligger 30 km øst for projektområdet. Regnserien blev omregnet til en CDS-regn, hvortil klimafaktorer blev pålagt, for at justere for den øgede nedbør i fremtiden.

Da regnserien blev inkluderet i modellen blev fire belægningstyper testet (Oprindelig, PICP, CGP og PC). Først blev den eksisterende belægning simuleret, for at sætte en standard for hvor meget nedbør, ledningsstykket skulle håndtere. Det resulterede i at den eksisterende situation, ifølge modellen, ikke oplevede oversvømmelser, selv med den højeste klimafaktor. Det blev vurderet at der var fejl i den originale model, men da der ikke var nogle forudsætninger for at ændre i informationerne derfra, blev der fortsat arbejdet videre med samme model. Ud fra informationer fra SWECO og Hjørring kommune er det tydeligt at der har været problemer med oversvømmelser, hvorfor de har besluttet at søge hjælp til løsning af problemet. Det blev derfor besluttet at lave en analyse af hvor meget de tre permeable belægninger reducerede nedbøren, der skulle håndteres af ledningsstykket.

De oplande der hører til brøndene blev fundet i den originale model og der blev undersøgt, hvor stor en andel af fortov, tilhørte de respektive oplande. Derved kunne det befæstede areal findes, ved at antage infiltrationsarealer for de tre belægningstyper. Her blev der benyttet 9, 30 og 100 % infiltration på henholdsvis PCIP, CGP og PC.

Udledningen af regnvand fra den sidste brønd i ledningsstykket, var reduceret med mellem 20,26 % og 24,35% for PC, alt afhængig af hvilken klimafaktor der blev benyttet. PICP havde en reduktion på mellem 1,72 % og 7,33 %, mens CGP blev reduceret med 6,03 % til 10,99%.

Derudover blev der målt vandstanden i brønden, for at vurdere, om der var opstuvning af vand. Det viste sig at der ikke var problemer med opstuvning ifølge modellen, så det blev

beregnet hvor meget vandniveauet i brønden blev reduceret ved de tre løsningsforslag. For PCIP blev vandniveauet sænket med mellem 2,12% og 5,23%, hvilket betød at vandstanden i brønden var reduceret med mellem 5 mm og 15 mm. For CGP var reduktionen mellem 4,66% og 7,38% hvilket svarede til en reduktion på 11 mm og 24 mm. Til sidst havde løsningen med PC reduceret vandniveauet med mellem 12,71% og 16,00%, som var svarende til mellem 30 mm og 52 mm reduktion i vandniveau.

Det viste sig at give de bedste resultater med PC, hvilket var forventet, da infiltrationsarealet var det højeste på den type belægning.

Cost-benefit analysen blev foretaget ud fra tilgængelige priser på internettet. Der blev ikke taget højde for mængderabat eller aftaler indgået mellem kommune og firmaer. Det viste sig at PCIP var den billigste løsning, da den vil koste 227.261 kr. for indkøb af fliser og. Dette skal dog implementeres og koster også mandetimer at få lagt. Derfor er prisen antaget at blive 100.000 kr. højere, efter lægningsarbejdet er medregnet. For CGP var fliserne markant dyrere og kostede 3.267.091 kr. at anlægge, med den type fliser. PC blev udregnet ud fra et postulat om at permeabel asfalt var 15% dyrere end almindelig asfalt, hvortil der blev fundet en pris for 40 m^2 asfalt. Det endte ud i 614.604 kr. for materiale og implementering.

9 Konklusion

Grundet oversvømmelser i bygninger omkring gågaden i Hjørring midtby, er det besluttet fra Hjørring kommune at klimasikre midtbyen. Ud fra Spildevandsplanen anbefales det at udføres med LAR-løsninger, da det ikke ønskes at regnvandet skal belaste afløbssystemet mere end højst nødvendigt. Ved at implementere LAR-løsninger bliver regnvandet håndteret lokalt. I dette projekt er der valgt en løsning, der involverer permeable belægninger, der skal sikre at ved større regnhændelser, kan en andel af vandet infiltrere ned i gennem jorden.

Der er valgt at analysere tre forskellige permeable belægninger, for at finde den mest optimale løsning. De tre løsningsforslag er PICP, CGP og PC, hvor de to første består af fliser med henholdsvis grus og græsbelægning, der sikrer at der kan infiltrere regnvand mellem fliserne. Den tredje løsning er permeabel beton eller asfalt, der er opbygget således at regnvand kan infiltrere gennem porerne i materialet.

Ved analysen af implementering af de tre permeable belægninger, viste det sig at PC havde den bedste virkning på ledningsnettet, da den høje mængde infiltration resulterede i at ledningsnettet blev aflastet bedst muligt. Det viste sig både på udledningen og på vandniveauet ved den sidste brønd i ledningsstykket.

For at beregne hvilken løsning bedst kunne betale sig, blev en cost-benefit analyse foretaget for de tre løsningsforslag. Dette blev gjort på baggrund af priser fundet på internettet, hvilket ikke gør op for eventuelle rabatter i forbindelse med et større projekt som dette. For at kunne sammenligne priserne, blev det gjort på baggrund af effekten af det respektive løsningsforslag. For hvert procentpoint løsningsforslaget forbedrede afløbssystemet, blev en pris udregnet. Dette blev gjort ud fra gennemsnittet af resultaterne ved de seks klimafaktorer. Det resulterede i at PCIP kostede 79.327 kr. ved udledning og 96.098 kr. ved vandniveauet. CGP endte med at koste 408.038 kr. for udledning og 585.631 kr. for vandniveauet. PC kostede 27.769 kr. for udledning og 44.688 kr. for vandniveau.

Dermed er løsningen med PC den der bedst kan betale sig økonomisk, mens CGP er den dyreste løsning. Dertil skal det tilføjes at PC over tid bliver tilstoppet, hvilket betyder at infiltrationsevnen forværres. Dette skal med i overvejelserne om at anlægge denne type belægning, da det kræver at blive rensat regelmæssigt. Ud fra resultaterne vil projektområdet blive implementeret med PC eller porøs asfalt, hvis der findes en løsning, hvor infiltrationsraten svarer til den for PC.

10 Perspektivering

Der vil blive perspektiveret til en artikel skrevet om klimaflisen, hvilket kan findes i [Kosmopol, 2023]. En løsning der ikke er undersøgt i dette projekt, er en såkaldt klimaflise. I de seneste fem år har der på en strækning på Nørrebro i København, ligget klimafliser. En klimaflise består af 42 huller foroven, der skal sikre infiltration ned til fem hulrum, der ligger inde i flisen på langs. Disse hulrum kan opbevare regnvandet og fungere som forsinkelsesbassin eller opbevaring af vand til eksempelvis planter ved længere tørkeperioder om sommeren. Hulrummet ligger på langs af flisen, så den kan kobles sammen med fliserne ved siden af, for at danne et større vandbassin til opbevaring. Den er designet til at kunne håndtere en tiårshændelse i år 2100. Derudover kan bassinet selv udtømmes eller bevare vandet, alt efter om det er en tørkeperiode eller om der er behov for at udtømningen sker inden en regnhændelse.

Klimaflisen koster en lille smule mere end en almindelig flise, men hvis den bliver lagt, når der alligevel skal skiftes eller rettes. Det er vurderet at ekstraomkostningerne i forbindelse med klimaflisen kun udgør en tiendedel af den udgift kommunen har til håndtering af vand. Dermed kan det være en god samfundsøkonomisk løsning.

Det er tiltænkt at have grønne områder omkring fliserne, da de kan supplere vand til beplantningen ved tørkeperioder, såfremt vandet ikke er fordampet i fliserne.

Denne løsning var også en mulighed i Hjørring, men da den er meget ny, kendes ulemperne ikke endnu og det vides ikke hvor godt de holder.

Litteratur

A/S, D. A. (2024). Hvad koster det? <https://www.danskasfalt.dk/vejledende-priseksemples.html>.

Bean, E. Z., Hunt, W. F., and Bidelsbach, D. A. (2007). Field survey of permeable pavement surface infiltration rates. <https://programs.ifas.ufl.edu/media/programsifasufledu/shed/publications/2007-Bean-Field-survey-of-permeable-pavement-surface-infiltration-rates.pdf>.

Cappelen, J. (2013). Danmarks klima 2013. https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/TR/2014/Tr14-01.pdf.

FCbeton (2024). Græsarmering. https://www.fc-beton.dk/graesarmering-40-graesareal-graa-costa-30x30x9_99r259.html.

for Rådgivende Ingeniører, F. (2020). State of the nation 2020. <https://www.frinet.dk/media/2858/kloak-og-spildevand.pdf>.

IBF (2024). Hvad koster det? <https://www.ibf.dk/professionel/Temaer/LAR-loesninger/Permeable-belaegninger/Hvad-koster-det/>.

Kosmopol, T. (2023). Københavnsk opfindelse: En særlig klimaflise kan redde os ved skybrud. <https://www.tv2kosmopol.dk/metropolen/koebenhavnsk-opfindelse-en-saerlig-klimaflise-kan-redde-os-ved-skybrud>.

Manan, A., Ahmad, M., Ahmad, F., Basit, A., and Khan, M. N. A. (2018). Experimental investigation of compressive strength and infiltration rate of pervious concrete by fully reduction of sand. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/68912672/bb91d684b5ff8e76ada790d070ad86b628ef-libre.pdf?1630132214=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DExperimental_Investigation_of_Compressiv.pdf&Expires=1709152029&Signature=DedxqFUXdR1s9qKWzvhlXAKrRu90bzcMt89wTdshW~KLCgKiiwJgDVYaBvXBv0CnEkg9K9E7rtFTlmkX3cGb0-Dge7NUzRyFhcaVWxd0iFcKWkFQ0kOpz7~OHv1JtG7dhmRe0-hED3oiHj1JRHx1IWt54xNLFNTwxBa7~sG3drU-VxSCfqR~y06vrMsefvdYt~lZAjCaNs2djsx-wUuaaVZhifRkQ~4dlcNpZE1ZeiMcGNJtTKWhLqEUkzAr6SXDqkOD~FA~K6gw-PSKkQWwuhngvI6gYIOkdyWIwrPE1hiw1RKob2uShtp5wKIMIEcCcJw7ZASNsFTZegkM16IFQ_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA.

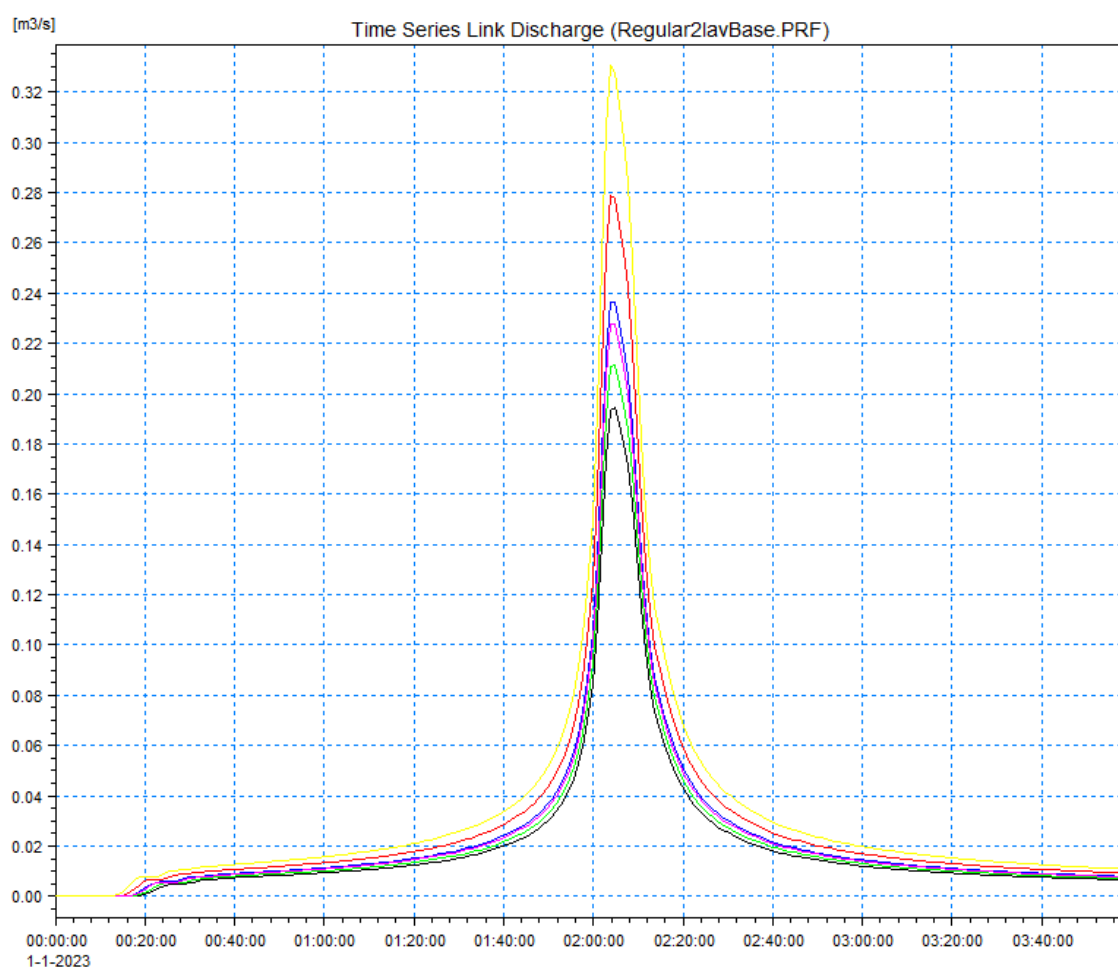
Miljøstyrelsen (1999). Spildevandsplan. <https://www2.mst.dk/udgiv/Publikationer/1999/87-7909-510-0/html/kap03.htm>.

- og Have Service, D. H. (2024). Betonfliser. <https://www.danskhusoghaveservice.dk/hvad-koster-det-at-faa-lagt-fliser-til-terrasse/>.
- Olesen, M., Madsen, K. S., Ludwigsen, C. A., Boberg, F., Christensen, T., Cappelen, J., Christensen, O. B., Andersen, K. K., and Christensen, J. H. (2014). Afremsidige klimaforandringer i danmark. *Danmarks Meterologiske Institut*.
- Ovesen, N. K., Fuglsang, L. D., Bagge, G., Krogsbøll, A., Sørensen, C. S., Hansen, B., Bødker, K., Thøgersen, L., Galsgaard, J., and Augustesen, A. H. (2009). *Lærebog i Geoteknik*, 1st. udgave. Polyteknisk forlag. ISBN 9788750210429.
- Spildevandskomiteen (2014). Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende regnintensiteter. https://ida.dk/media/2994/svk_skrift30_0.pdf.
- Statistik, D. (2022). Indbyggertal. <https://www.statistikbanken.dk/BY1>.
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. https://www.int-res.com/articles/cr_oa/c047p123.pdf.
- XL-byg (2024). Sådan blander du den perfekte beton til opgaven. <https://www.xl-byg.dk/xl-pro/artikel/sadan-blander-du-den-perfekte-beton-til-opgaven>.

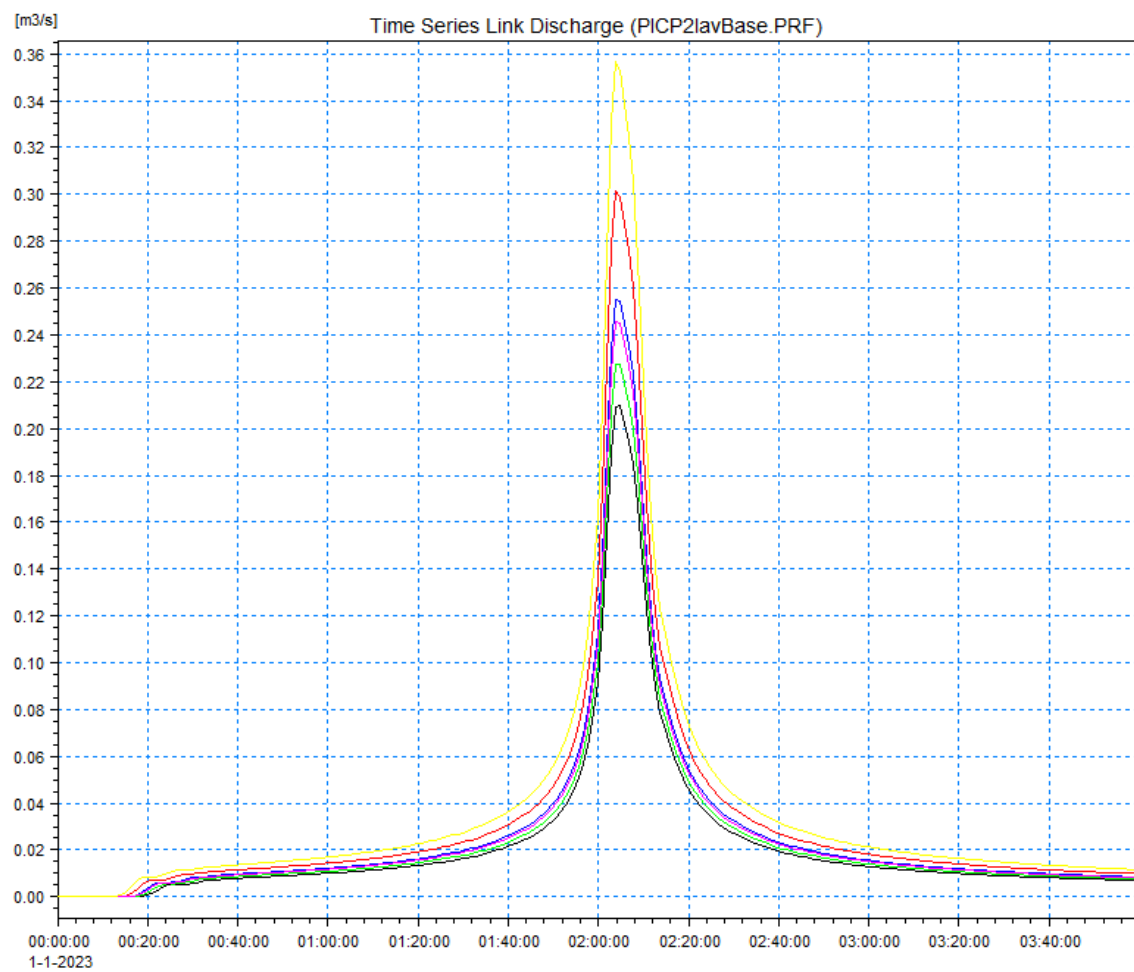
A Modelresultater

Dette appendix indeholder resultater fra simuleringerne i MIKE Urban.

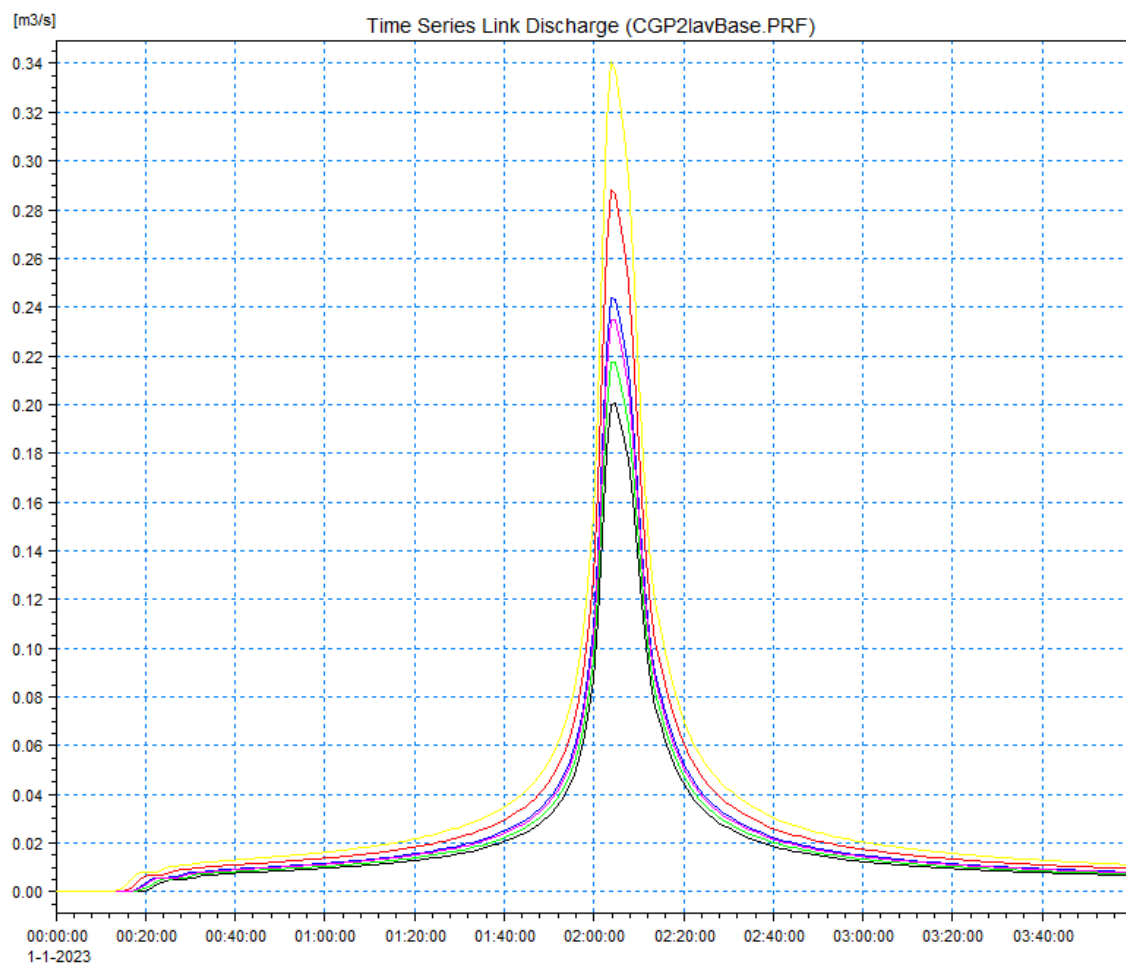
A.1 Udledning



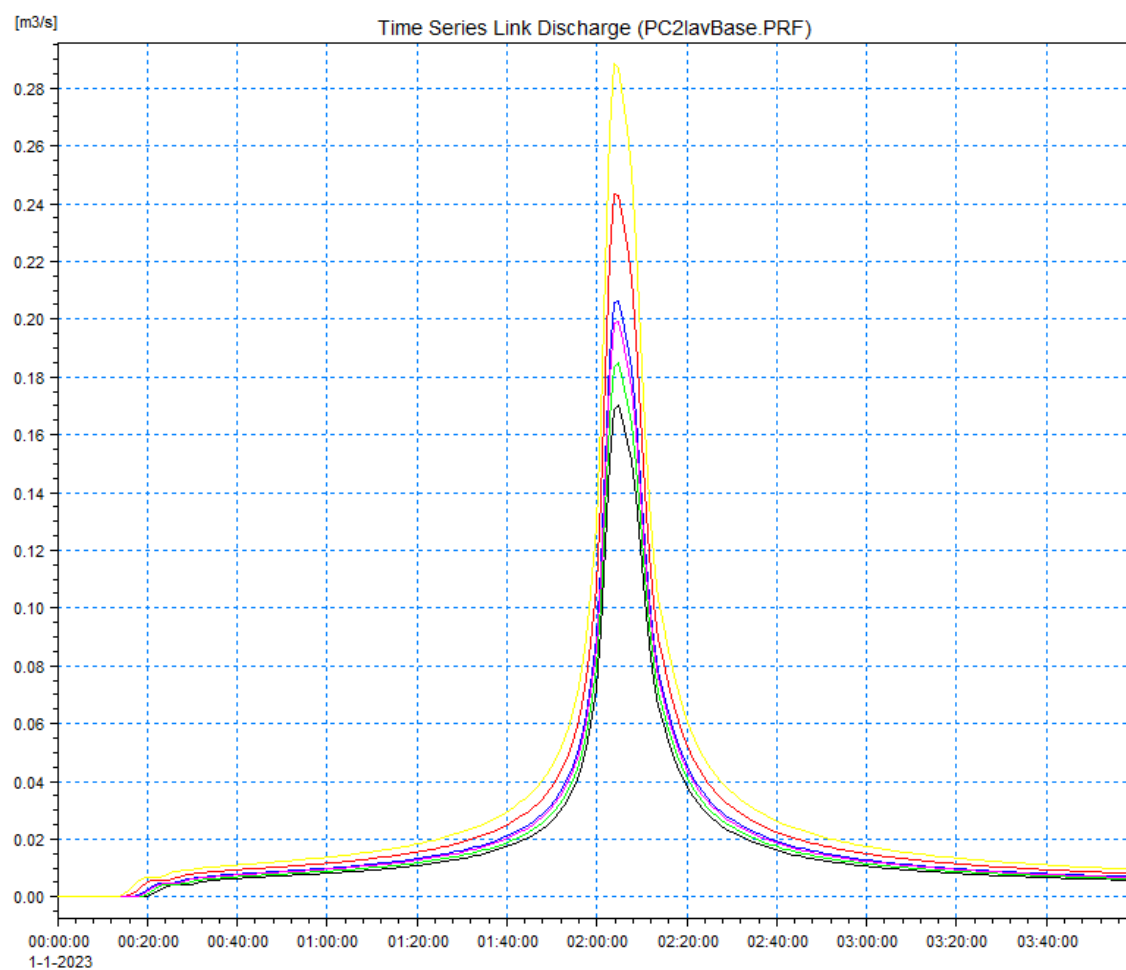
*Figur A.1.*Udledning eksisterende



*Figur A.2.*Udledning PICP

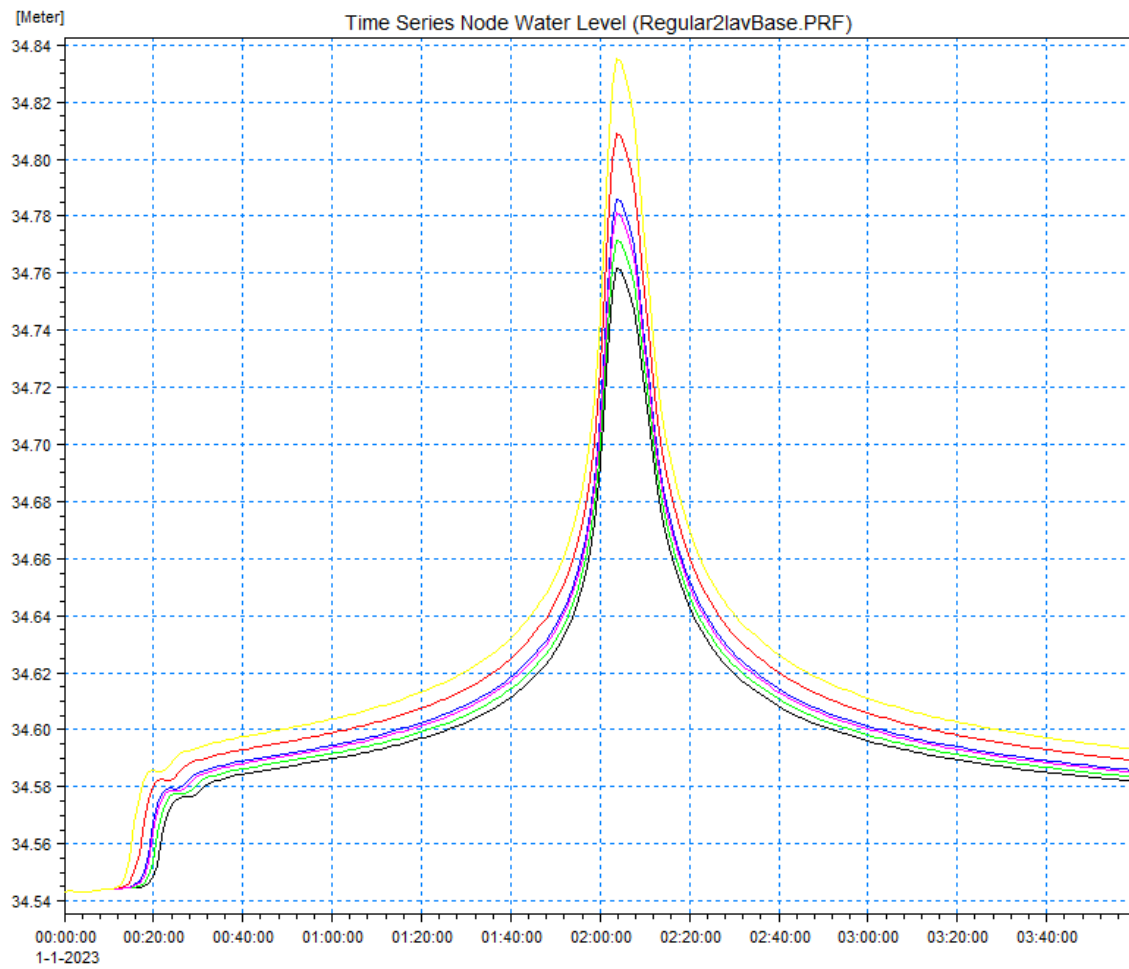


Figur A.3. Udledning CGP

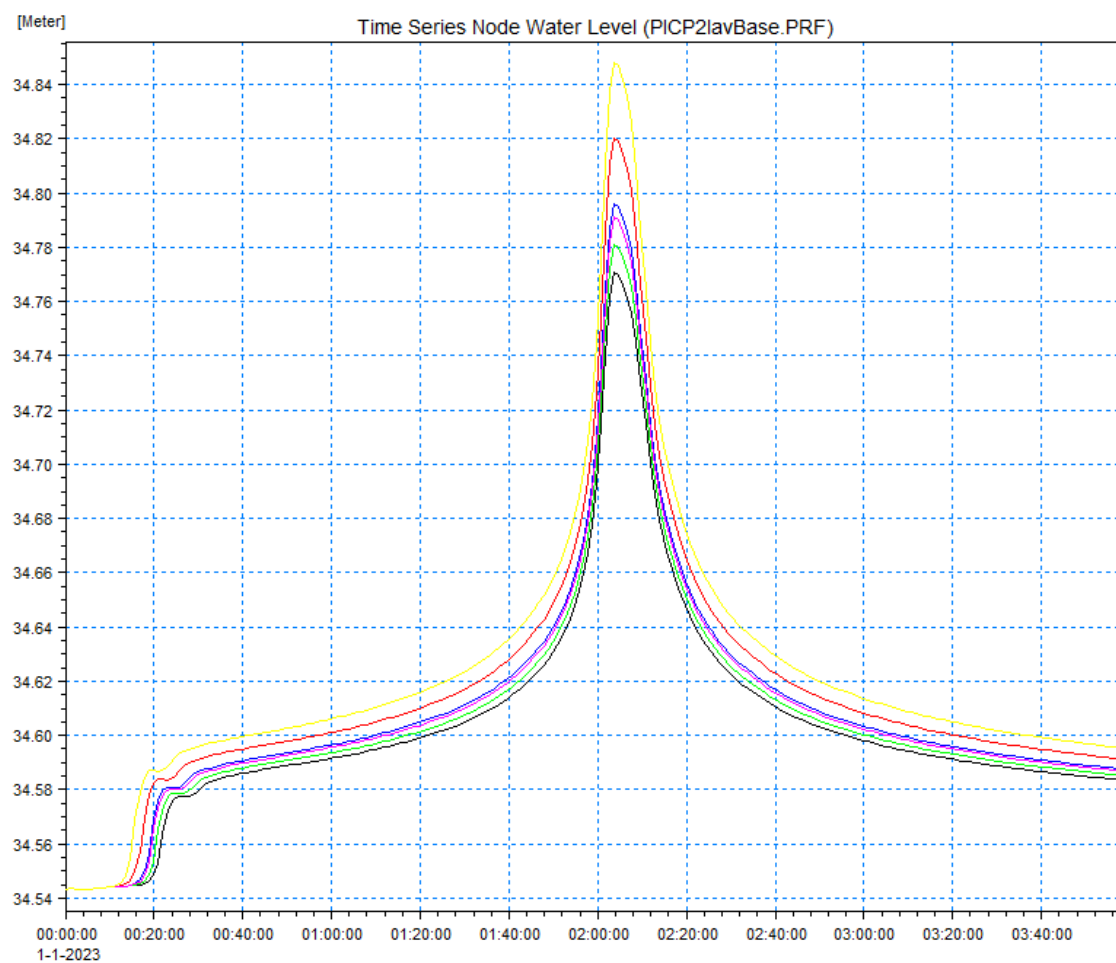


*Figur A.4.*Udledning PC

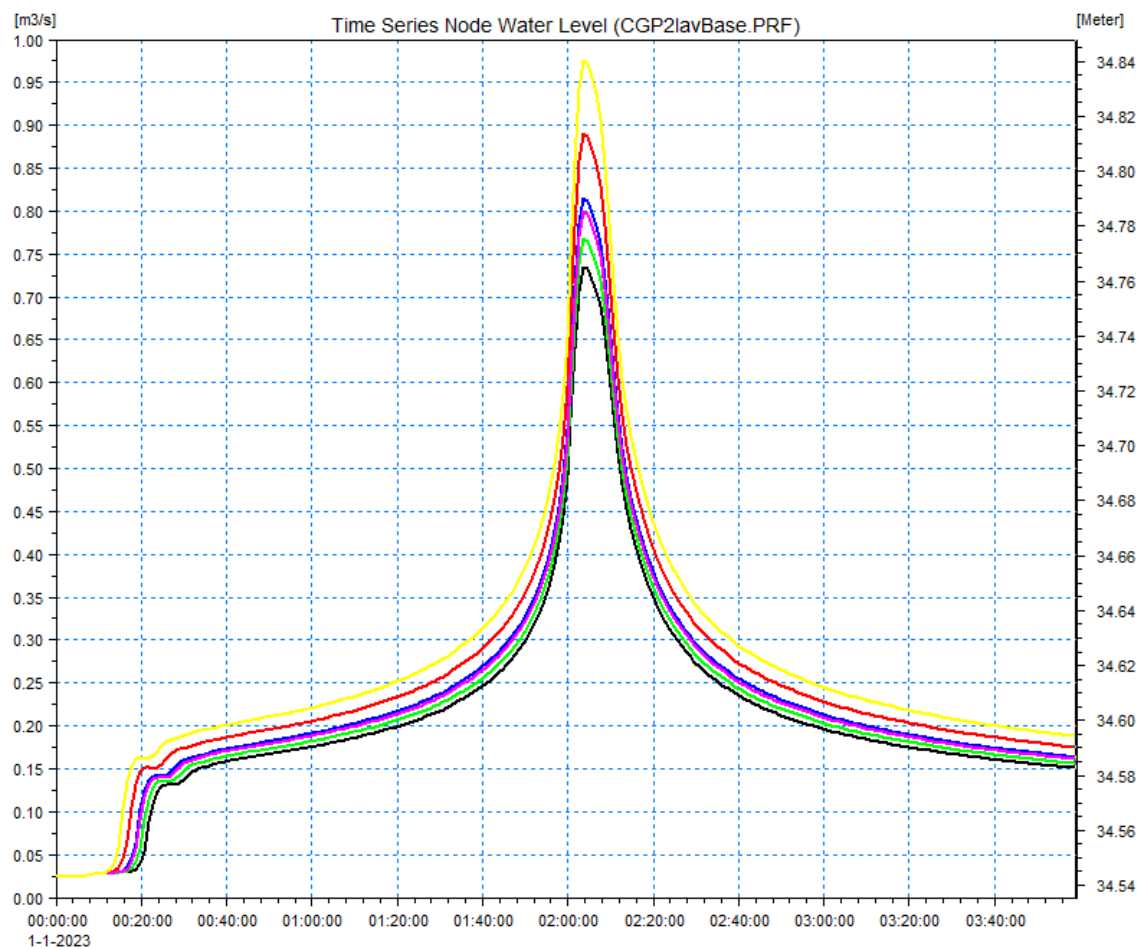
A.2 Vandniveau



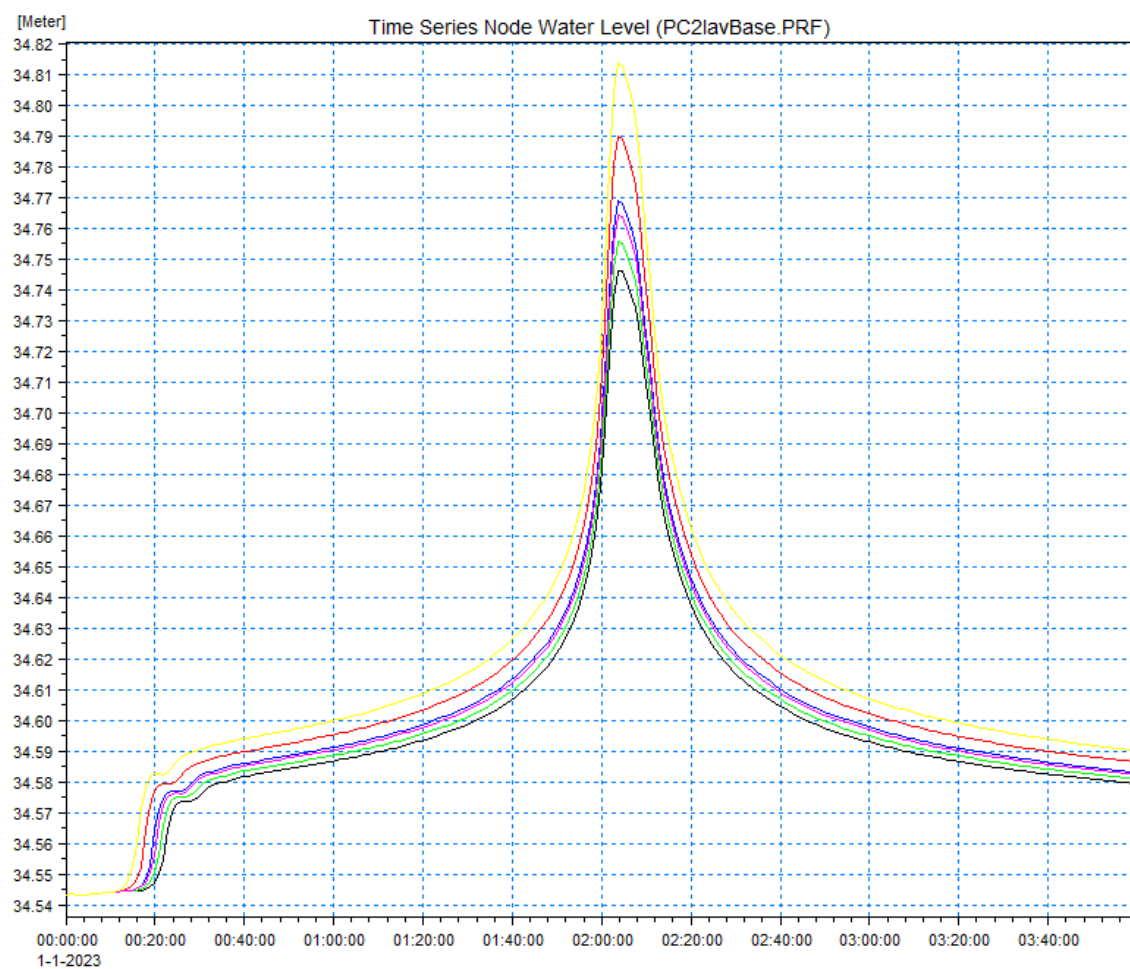
Figur A.5. Vandniveau eksisterende



Figur A.6. Vandniveau PICP



Figur A.7. Vandniveau CGP

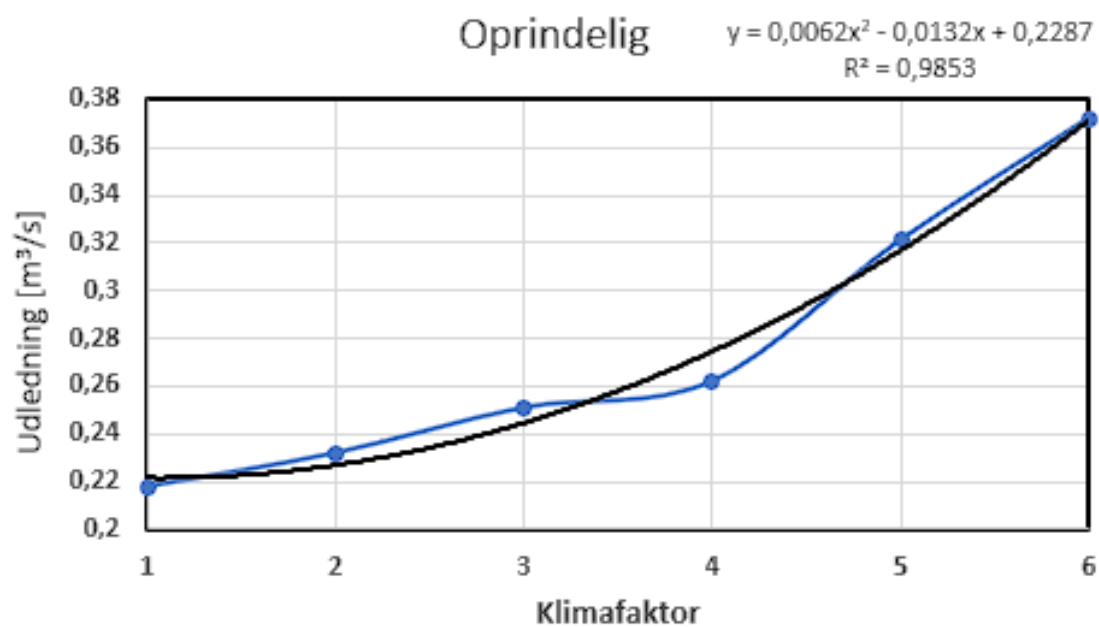


Figur A.8. Vandniveau PC

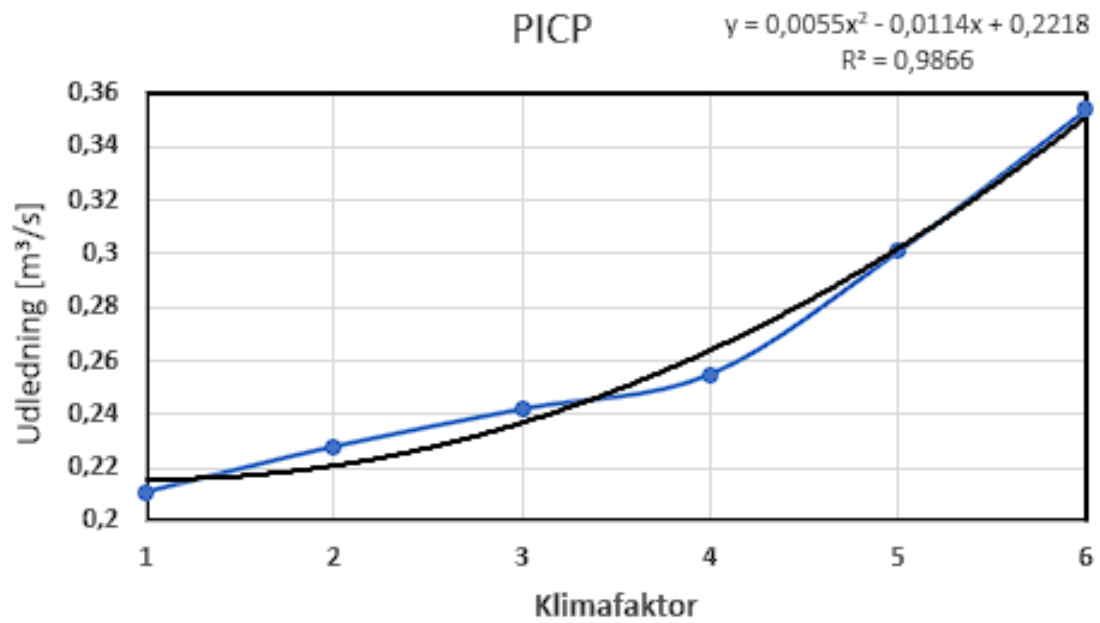
B Sammenligning af permeable belægninger

B.1 Udledning

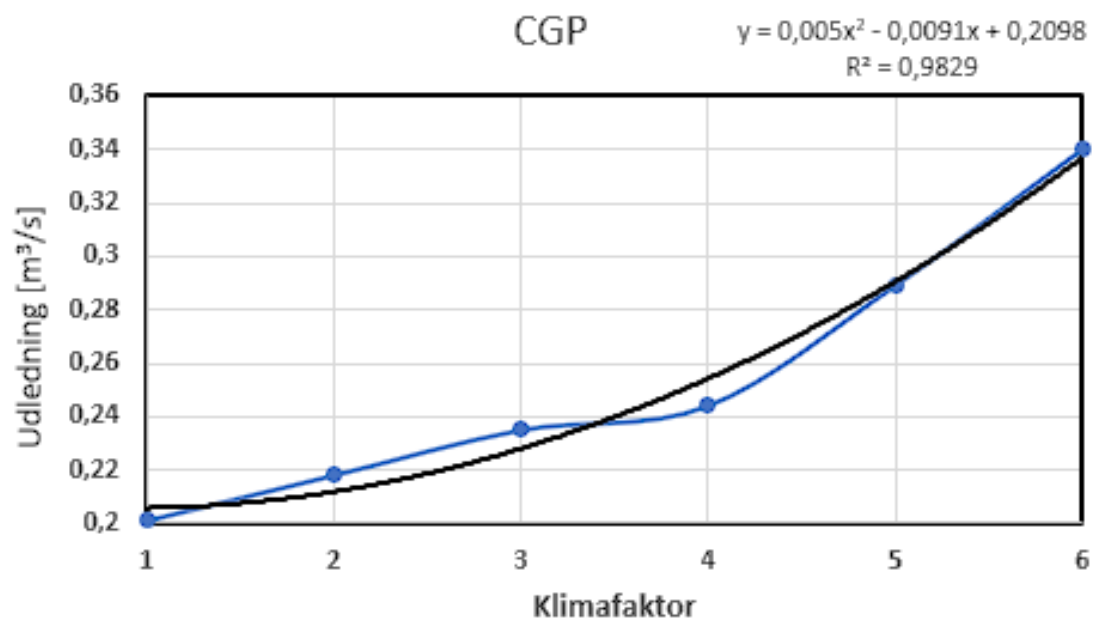
Sammenligning af resultater for reducere af udledning i Brønd 6



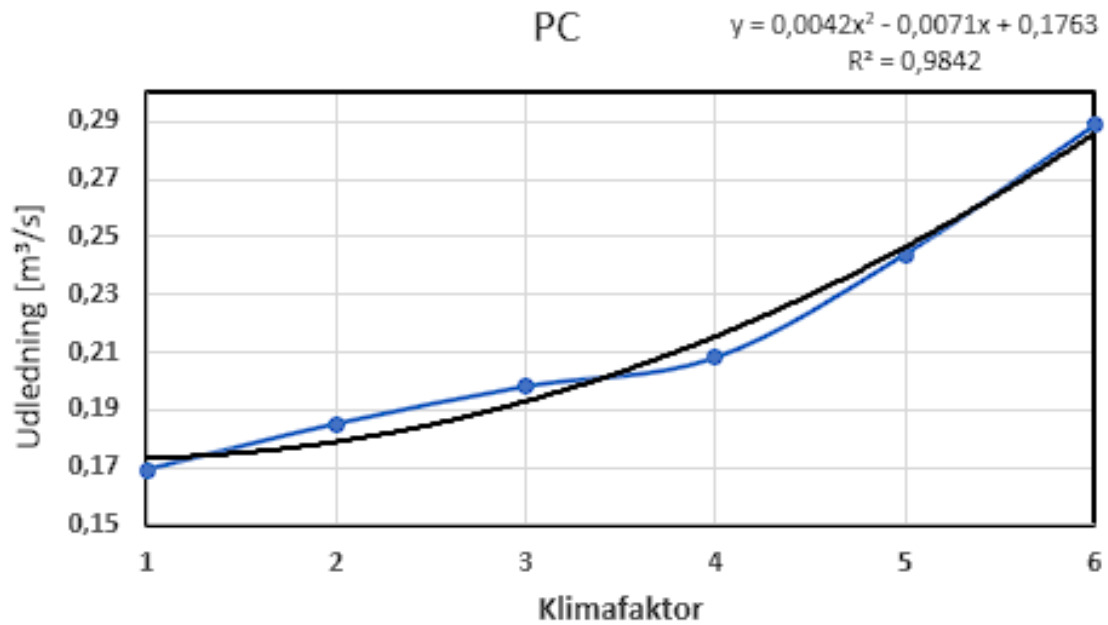
Figur B.1. Udledning eksisterende



*Figur B.2.*Udledning PC



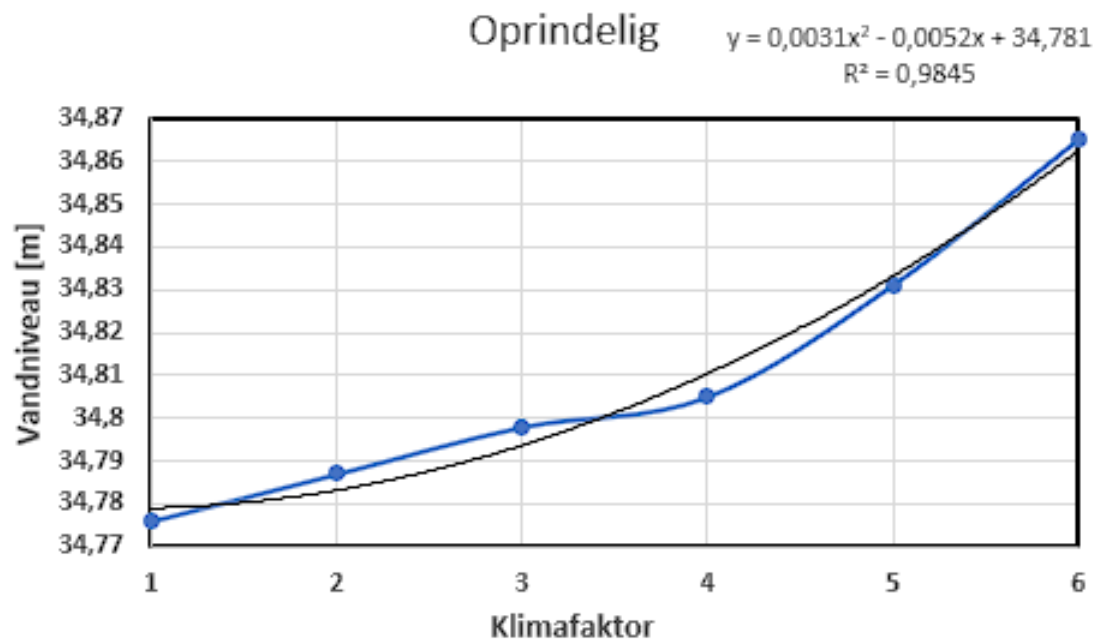
*Figur B.3.*Udledning CGP



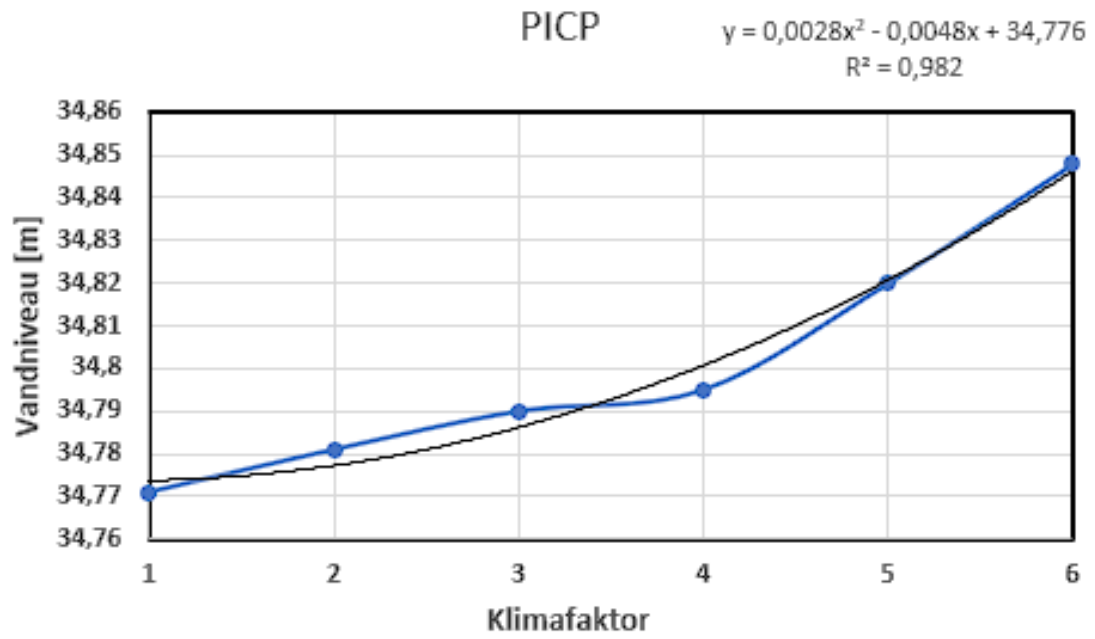
*Figur B.4.*Udledning PC

B.2 Vandniveau

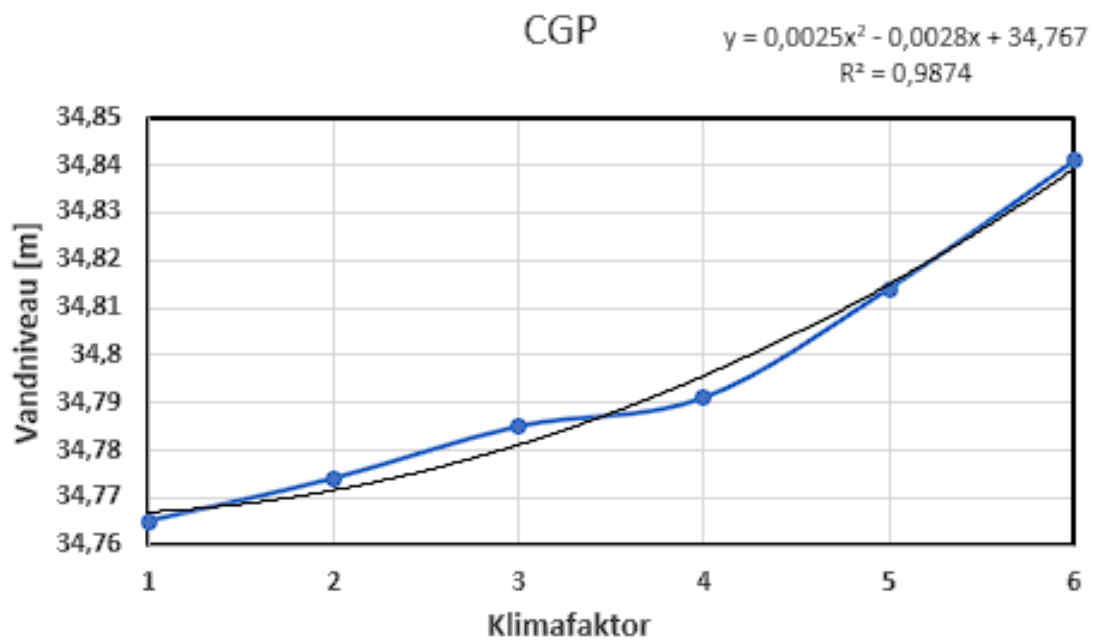
Sammenligning af resultater for reducering af vandniveau i Brønd 6.



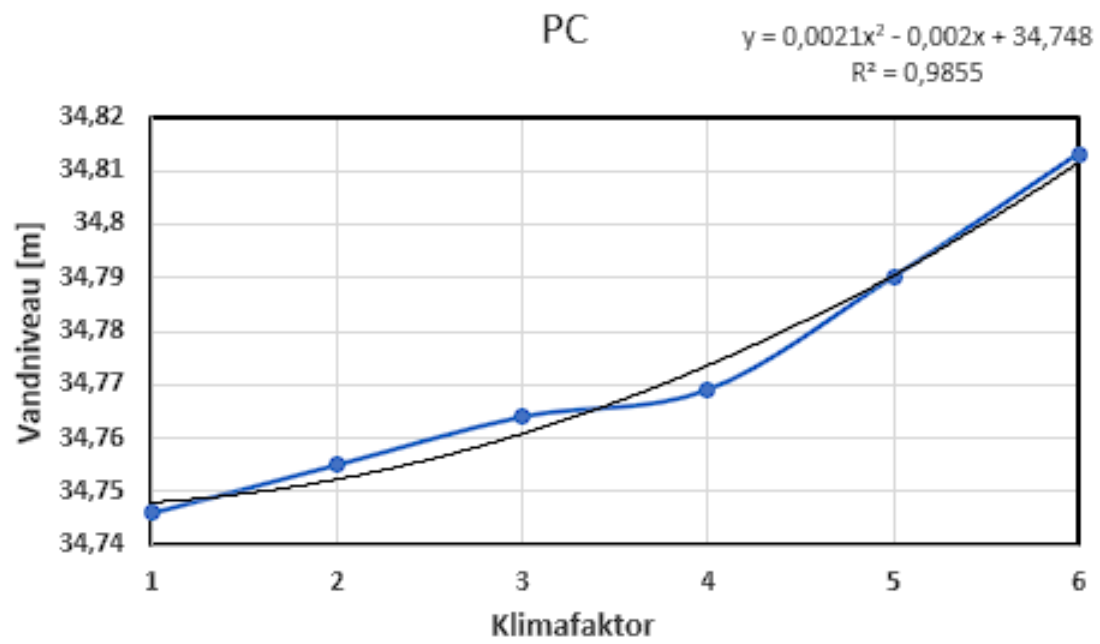
*Figur B.5.*Vandniveau eksisterende



Figur B.6. Vandniveau PC



Figur B.7. Vandniveau CGP



Figur B.8. Vandniveau PC