

o+bn

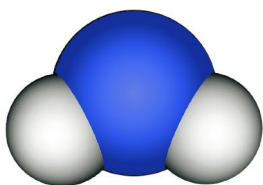
Kennisnetwerk OBN

Oplossingen voor
diepe insnijding van beken
in het heuvelland



Oplossingen voor diepe insnijding van beken in het heuvelland

Roy Laseroms – LWRO



LWRO
*adviesbureau voor
water, natuur en ruimte*

ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn



provincie limburg

©2022 IPO, Vereniging het Interprovinciaal Overleg, BIJ12, uitvoeringsorganisatie van de gezamenlijke provincies, Utrecht.

Rapport nummer 2022/OBN253-HE

Projectnummer OBN- 2018-104-HE

Deze publicatie is tot stand gekomen met een financiële bijdrage van BIJ12, het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en provincie Limburg

Teksten mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

*Wijze van citeren: Laseroms, R, 2021. **Oplossingen voor diepe insnijding van beken in het heuvelland.** Rapport nummer 2021/OBN253-HE, Kennisnetwerk OBN, Driebergen.*

Deze uitgave is online gepubliceerd op www.natuurkennis.nl

Samenstelling R. Laseroms - LWRO

Foto voorkant Diepe insnijding. Fotograaf: Roy Laseroms

Productie Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE)
Adres: Princenhof Park 7, 3972 NG Driebergen
Telefoon: 0343-745250
E-mail: info@vbne.nl

Voorwoord

Behoud maar zeker ook het herstel van biodiversiteit behoort tot de kerndoelen van de overheid. Om dit doel te realiseren ontwikkelt en verspreidt het Kennisnetwerk Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit (OBN) daarvoor toepasbare kennis over herstelmaatregelen voor Natura 2000, de aanpak van stikstof, de leefgebiedenbenadering, de ontwikkeling van nieuwe natuur én het cultuurlandschap.

Erosie is in de Zuid-Limburgse beekdalen een natuurlijk fenomeen, maar de laatste decennia veroorzaakt het steeds vaker problemen. De oorzaken zijn in het algemeen wel bekend. Toename van verhard oppervlak, veranderingen in de riolering, intensivering van de landbouw en extreme regenbuien leiden tot meer en frequentere overstorten, lozingen en piekafvoeren in de beken, met extra erosie als gevolg. De onnatuurlijke snelle diepe insnijding van de beekbedding kan leiden tot allerlei hydrologische veranderingen, waardoor kenmerkende levensgemeenschappen onder druk komen te staan. Om deze levensgemeenschappen te beschermen, zijn herstelmaatregelen nodig. De processen en mechanismen achter de erosie zijn echter nog niet voldoende duidelijk en daardoor zijn er nog geen effectieve oplossingen. Dit onderzoek is erop gericht om dit beter te doorgronden.

Eerst is de problematiek bestudeerd door literatuuronderzoek, interviews met deskundigen en diverse veldverkenningen. Daarna zijn onderzoekslocaties geselecteerd waar intensief is gemeten om inzicht te krijgen in het functioneren van de watersystemen. Vervolgens zijn op locaties waar de insnijding het grootst is een aantal experimentele effectgerichte maatregelen uitgevoerd en gemonitord in de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf. Vanwege de kwetsbaarheid van de levensgemeenschappen in de beekdalen is eerst alleen extra grind ingebracht en zijn later ook grindmatjes en worteldoek van biologisch afbreekbaar cellulose toegepast. Deze innovatieve maatregelen hebben de erosie vertraagd, maar ze vormen nog geen duurzame oplossing.

Uit het onderzoek is gebleken dat een zorgvuldige watersysteemanalyse noodzakelijk is om inzicht te krijgen in het functioneren van de processen in de watersystemen en mogelijke oplossingen. Daarnaast is duidelijk geworden dat effectgerichte maatregelen niet duurzaam zijn en dat moet worden ingezet op brongerichte maatregelen die de piekafvoeren met name bij overstorten verder beperken. In het rapport wordt dit verder toegelicht en worden mogelijke effectieve oplossingen genoemd. Deze kunnen ook bijdragen aan de beperking van de wateroverlast. Daarmee blijft de kwetsbare natuur in de beekdalen waarschijnlijk beter in stand.

Ik wens u veel leesplezier,

Teo Wams
Voorzitter van de OBN Adviescommissie

Inhoud

Samenvatting	5
Summary	8
Dankwoord	11
1. Inleiding	12
1.1 Probleemstelling	12
1.2 Doel van het onderzoek	13
1.3 Kennisvragen	13
1.4 Leeswijzer	14
2. Onderzoeksstrategie en methoden	15
2.1 Inleiding	15
2.2 Watersysteemanalyse	16
2.3 Veldverkenningen	18
2.4 Quick scan	24
2.5 Stroomgebiedskenmerken	27
2.6 Selectie onderzoeksgebieden	30
2.7 Selectie locaties en maatregelen	31
2.8 Monitoring	31
3. Resultaten watersysteemanalyses	33
3.1 Keutelbeek in Kelmonderbos	33
3.2 Strabeker Vloedgraaf in Ravensbosch	38
4. Resultaten monitoring	44
4.1 Neerslag	44
4.2 Peilmetingen Keutelbeek	45
4.3 Peilmetingen Strabeker Vloedgraaf	46
4.4 Debietmeting Strabeker Vloedgraaf	49
4.5 Metingen erosie Strabeker Vloedgraaf	52
4.6 Relatie met macrofauna	54
4.7 Relatie grondwater Strabeker Vloedgraaf	55

5. Resultaten experimenten	57
5.1 Grindsuppletie Keutelbeek	57
5.2 Grindsuppletie Strabeker Vloedgraaf	61
5.3 Vervolg experimenten Strabeker Vloedgraaf	68
6. Synthese	81
6.1 Conclusies	81
6.2 Aanbevelingen	83
6.3 Antwoorden op de kennisvragen	84
7. Literatuur	87
Bijlagen	91
Bijlage 1: Overzicht locaties met diepe insnijding	92
Bijlage 2: Selectie onderzoeksgebieden	93
Bijlage 3: Overzicht locaties Strabeker Vloedgraaf	94
Bijlage 4: Figuren watersysteemanalyses	98
Bijlage 5: Gegevens riolering Schimmert eo	103
Bijlage 6: Resultaten peilmetingen	107
Bijlage 7: Resultaten SOBEK-berekeningen	111
Bijlage 8: Resultaten erosiebouten	115
Bijlage 9: Resultaten LISEM-berekeningen	117

Samenvatting

Achtergrond en aanleiding

Erosie is in Zuid-Limburg al lange tijd een probleem hoewel dit deels wordt veroorzaakt door natuurlijke processen, zoals de oppervlakkige afstroming van hemelwater. De laatste decennia is echter sprake van een toename van deze oppervlakkige afstroming en van de afvoerdynamiek in de beken. Dit is vooral toe te schrijven aan de toename van het verharde oppervlak, veranderingen in de riolering (inclusief afkoppelen) en intensivering van de landbouw. De afstroming van het hemelwater wordt minder gehinderd, waardoor het minder goed kan infiltreren en versneld wordt afgevoerd naar lager gelegen gebieden en beekdalen, vaak via de vloedgraven. Vooral de zomerse onweersbuien die gepaard gaan met extreme neerslaghoeveelheden leiden tot piekafvoeren in de beken waardoor de erosie en de insnijding worden versneld en versterkt. Deze onnatuurlijke snelle diepe insnijding kan leiden tot lokale veranderingen in de hydrologie langs de beken, waardoor de levensgemeenschappen die afhankelijk zijn van bron- en grondwater onder druk staan. Verder is men bezorgd dat de onnatuurlijke diepe insnijding van bronbeken in het Heuvelland leidt tot verlaging van de grondwaterstand, verdere erosie in de zijtakken en een sterke vermindering of zelfs het verdwijnen van kwel in het beekdal. Daarnaast veroorzaken piekafvoeren in de beken direct hydraulische stress voor de aanwezige levensgemeenschappen, leidend tot drift van de macrofauna en ecologische verarming van de beekbedding. Ook kunnen veranderingen in het sedimenttransport en de waterkwaliteit optreden, waardoor kenmerkende (grondwaterafhankelijke) habitattypen zoals kalktufbronnen en soorten in en nabij de beek worden aangetast en op den duur zelfs kunnen verdwijnen. Recent onderzoek in de Noor (Campuzano Izquierdo, 2017) heeft de urgentie aangetoond.

Doel en afbakening van het onderzoek

Het doel van het onderzoek was het formuleren van effectgerichte maatregelen voor het duurzaam herstel van onnatuurlijk diep ingesneden beken in het Heuvelland. De nadruk lag op effectgerichte maatregelen die zowel effect hebben op de natuurwaarden in de beek zelf als op de grondwaterafhankelijke natuur in de directe omgeving. De focus lag daarbij op de gebieden en natuurwaarden die zowel bescherming genieten op basis van Natura 2000, de Europese Kaderrichtlijn Water als de water-beheerplannen van provincie en waterschap (natuurbeken).

Oorspronkelijk was de opdracht beperkt tot het zoeken naar, en het verrichten van experimenten met, uitsluitend effectgerichte maatregelen tegen diepe insnijding van heuvellandbeken, zoals ook uit de onderstaande kennisvragen blijkt. Gedurende het onderzoek is bij de watersysteemanalyse echter ook globaal verkend welke brongerichte maatregelen oplossingen kunnen bieden. Deze mogelijke brongerichte maatregelen zijn daardoor wel minder gedetailleerd onderzocht en minder ver uitgewerkt.

Er zijn meerdere oorzaken en vormen van erosie en insnijding, maar hier beperken we ons tot de fluviaatiele erosie in de beekbedding en de daarmee gepaard gaande diepe insnijding.

De bovengenoemde overwegingen en zorgen hebben geleid tot de volgende kennisvragen die in dit rapport worden beantwoord:

1. Welke ervaringen zijn elders (in praktijk vooral in naburig buitenland) al opgedaan met het herstel van snelstromende, te diep ingesneden beken? En bieden deze ervaringen perspectief op een duurzaam herstel van de bronbeekecosystemen in het Heuvelland?
2. Met welke effectgerichte (herstel)maatregelen valt de negatieve invloed van een onnatuurlijke insnijding te herstellen?
3. Welke maatregelen kunnen aanvullend ingezet worden om hernieuwde insnijding van herstelde beken te voorkomen?

Uitvoering onderzoek

Om de kennisvragen te beantwoorden is eerst literatuuronderzoek verricht en zijn interviews gehouden met diverse specialisten, deskundigen en beheerders. Tegelijkertijd zijn frequente veldverkenningen en intensieve hydrologische en morfologische monitoring verricht waarmee vervolgens een watersysteemanalyse is uitgevoerd. Tenslotte zijn als proef op de som in de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf experimentele maatregelen uitgevoerd en gemonitord. Uit de inventarisatie en watersysteemanalyse bleek al in een vroeg stadium dat het niet mogelijk was om de bestaande modelberekeningen te gebruiken en dat er te weinig meetgegevens waren om voldoende kwantitatief inzicht te krijgen in de bodemopbouw en de routes van het hemelwater. Daarom is de monitoring geïntensiveerd en zijn zeer frequent veldverkenningen uitgevoerd. Zo zijn met succes ook waarnemingen gedaan van de extreme buien op 17 juni 2020, 29 juni 2021 en 14 juli 2021. Zodoende is waargenomen hoe het water afstroomde en waar het vandaan kwam. Uit de combinatie van de continue peilmetingen, debietmetingen, metingen van bodempeilen, visuele waarnemingen en een eigen globaal model is een goed beeld verkregen van de afvoeren in de watersystemen van de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf. Hiermee konden de kennisvragen voldoende worden beantwoord. Door aanpassingen in de recent aangelegde buffer direct bovenstrooms het onderzoekstraject tijdens de experimenten konden de metingen in de Keutelbeek niet goed worden gevalideerd en geëvalueerd, daarom is het onderzoek in de Keutelbeek minder uitvoeriger geweest dan in de Strabeker Vloedgraaf.

Experimenten

Ten behoeve van de experimenten is eerst een selectie gemaakt uit een reeks locaties waar sprake was van diepe insnijding op basis van stroomgebiedskennmerken en beschikbaarheid van gegevens. Als experimentele effectgerichte maatregelen zijn in eerste instantie uitgevoerd:

- grindsuppletie in de Keutelbeek;
- grindsuppletie in de Strabeker Vloedgraaf;

En vervolgens in de Strabeker Vloedgraaf:

- grindmatjes;
- worteldoek (biologisch afbreekbaar cellulose).

Na uitvoering van de maatregelen zijn door monitoring de effecten bepaald tot 12 november 2021.

Onderzoeksresultaten

De belangrijkste onderzoeksresultaten zijn:

- het is gelukt om betrouwbare meetreeksen te verkrijgen van continue peilmetingen, debietmetingen en metingen van de beddingbodem in de onderzoekstrajecten;
- de eigenschappen van löss, leem en met name colluvium en daarmee de erosiebestendigheid variëren ruimtelijk sterk, de oevererosie wordt bovendien versterkt door vorst;
- in het onderzoekstraject van de Keutelbeek bestaan de oevers en de beekbodem uit een wat minder cohesief mengsel van materiaal (voornamelijk löss en leem), in de Strabeker Vloedgraaf bestaan de oevers uit een meer cohesief mengsel van leem en grind en bestaat de beekbodem voornamelijk uit grind;
- het traject in de Strabeker Vloedgraaf heeft grotere piekafvoeren en een grotere hydraulische belasting dan het traject de Keutelbeek waar de piekafvoeren beter worden gedempt;
- er zijn frequent overstortingen, lozingen en afstroming van verharde oppervlakken gemeten en waargenomen die hebben geleid piekafvoeren in de onderzoekstrajecten
- hoewel erosie ook optreedt bij lagere afvoeren zijn het vooral de piekafvoeren die de grootste erosie veroorzaken, vooral naarmate ze langer duren;
- niet de absolute amplitude van de debieten, maar de combinatie van amplitude, duur en frequentie (samen de arbeid of hydraulische belasting) en de timing zijn bepalend voor de mate van erosie.

Conclusies

Uit de analyse van de onderzoeksresultaten en de synthese kan worden geconcludeerd dat:

- de grindsuppletie in de Keutelbeek stabiel is geweest, tot de extreme buien van 14 juli 2021 waarbij lokaal door stroomverlegging de teen van het talud is aangetast en de oever is ingezakt,
- de grindsuppletie in de Strabeker Vloedgraaf niet succesvol is geweest maar deze niet objectief te evalueren is, doordat de grindsuppletie in de Strabeker Vloedgraaf is verstoord zeer kort voor de piekafvoer van 17 juni 2020;
- de grindmatjes en het worteldoek in de Strabeker Vloedgraaf goed hebben gefunctioneerd, ook na de piekafvoeren van 14 juli 2021, tot tenminste 12 november 2021;
- de erosie wel vertraagd is, maar dat deze maatregelen geen duurzame oplossingen vormen en dat daarvoor met spoed meer brongerichte grootschalige maatregelen noodzakelijk zijn;
- overstorten, lozingen en het via de bestrating afstromende water de grootste effecten hebben op de erosie van de onderzoekslocatie in de Strabeker Vloedgraaf en vaker voorkomen dan werd verwacht en waarvan beleidsmatig is uitgegaan.

Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om zo snel mogelijk aanvullende grootschalige brongerichte maatregelen te nemen. Dit gebeurt deels al in het kader van het project "Water in Balans", maar het is nog niet duidelijk of deze in de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf effect hebben. Hoewel het geen onderdeel van dit onderzoek was en nader dient te worden onderzocht kan worden gesteld dat deze bronmaatregelen moeten resulteren in:

- reductie van de afvoer en minder langduriger pieken van overstorten en lozingen, bv door meer berging in de riolering te realiseren en verdere optimalisatie van de buffers;
- verlenging van de verblijftijd en ledigingsduur van de buffers zodanig dat dit geleidelijk gebeurt en niet leidt tot te grote en langdurige hydraulische belasting van de kwetsbare beken;
- minder snelle afvoer van het hemelwater naar en via de vloedgraven;
- bevorderen van infiltreren en bergen, door verwerking van hemelwater op eigen terrein;
- toename van de berging van water op bestrating, bv tussen drempels, leg dorpels in goten en benut de berging in de riolering efficiënter;
- afleiden onvermijdelijke lozingen (via leidingen) naar vlakkere plekken verder benedenstrooms.

Voor zeer waardevolle en kwetsbare levensgemeenschappen van bronnen en beken, zoals de stroomminnende macrofauna en de waardevolle bronvegetaties die direct worden bedreigd, dient nader te worden bestudeerd of de reductie van de overstorten wel volstaat en of het mogelijk is de lozing geheel op te heffen.

De invloed van de diepe insnijding op de nabijgelegen natuurgebieden in de beekdalen en -flanken is niet diepgaand onderzocht omdat daarvoor te weinig peilbuizen en ook geen grondwaterafhankelijke vegetaties aanwezig waren. Uit de peilbuis bij het experimentele traject in de Strabeker Vloedgraaf is gebleken dat de grondwaterstand zich onder de beekbodem bevond en er geen directe relatie was tussen het grondwater en de waterstand in de beek. Er was eerder sprake van infiltratie van het beekwater. Dit is een aanwijzing dat goed maatwerk nodig is om te bepalen in welke mate beken drainerend werken op hun omgeving.

De toegepaste werkwijze met korte intensieve monitoring kan worden gebruikt om beter inzicht te krijgen in het functioneren van de watersystemen van beken en rivieren zoals de Geul, onder diverse en ook zeer extreme omstandigheden.

Summary

Background to the research

Erosion in the Heuvelland region, the most southernly part of the Netherlands, has been a problem for many years, although this is partly due to natural processes, such as surface runoff of rainwater. However, in recent decades there has been an increase in this surface runoff and in discharge dynamics in streams. This is mainly due to the increase in paved surfaces, changes to sewerage systems (including disconnection) and agriculture intensification. Rainwater runoff is less hindered, thereby reducing rainwater infiltration and accelerating discharge to lower areas and stream valleys, often via specially prepared trenches. Summer thunderstorms, particularly those accompanied by extreme rainfall, result in peak discharges in the streams which accelerates and intensifies erosion and incision. This unnatural rapid deep incision can lead to local changes in the hydrology along the streams, putting pressure on ecological communities which depend on spring and groundwater. Furthermore, there is concern that the unnaturally deep incision of source streams in the valley woodland leads to a lower groundwater level, further erosion in the tributaries and a sharp reduction or even disappearance of seepage in the stream valley. In addition, peak discharges in the streams cause immediate hydraulic stress for the ecological communities present, resulting in macrofauna drift and ecological impoverishment of the stream bed. Changes in sediment transport and water quality can also occur, affecting characteristic (groundwater-dependent) habitat types such as calcareous tuff springs and species in and near the stream and which can even disappear over time. Recent research in the Noor (Campuzano Izquierdo, 2017) has demonstrated the urgency.

Aim and scope of the research

The aim of the research was to formulate effect-oriented measures for sustainable restoration of unnatural deeply eroded stream valleys in the Heuvelland. The emphasis lay on effect-oriented measures that impact the natural resources in the stream itself as well as on the groundwater-dependent nature in the immediate vicinity. The focus was on the areas and natural resources that enjoy protection from the Natura 2000 programme, the EU Water Framework Directive, as well as from the water management plans drawn up by the province and the water board (natural streams).

Originally, the assignment was limited to searching for, and experimenting with, only effect-based measures to counter deep incision of Heuvelland streams, as transpires from the issues requiring further research stated below. However, as part of the research, water system analysis also broadly explored which source-oriented measures would offer solutions. These potential source-oriented measures have therefore not been studied in depth and have been worked out in less detail.

There are several causes and forms of erosion and incision, but in this study, we limit our scope to fluvial erosion in the stream bed and the associated deep incisions.

The considerations and concerns mentioned above have led to identifying the following issues requiring further research which are addressed in this report:

1. What experience has already been gained elsewhere (in practice, especially in neighbouring countries) with restoring fast-flowing, too deeply incised streams? And do these experiences offer perspective for sustainable recovery of the spring-stream ecosystems in the Heuvelland?
2. Which effect-oriented (remedial) measures can be used to counter the negative influence of an unnatural incision?
3. Which additional measures can be deployed to prevent incision occurring again in streams that have been restored?

Conducting the study

To address the research questions, literature research was conducted and then various specialists, experts, and administrators were interviewed. At the same time, frequent field surveys, including intensive hydrological and morphological monitoring, were conducted, and used as input to a water system analysis. Finally, to test the hypotheses, experimental measures were carried out and monitored in the Keutelbeek and the Strabeker Vloedgraaf.

At an early stage of the inventory and the water system analysis it showed that it was not possible to use the existing model calculations. Furthermore, there was not enough measurement data to gain sufficient quantitative insight into the soil structure and the paths rainwater follows. Monitoring was therefore intensified and very frequent field surveys were conducted. Consequently, the extreme showers on 17 June 2020, 29 June 2021, and 14 July 2021 could be successfully observed. So, it was possible to observe where the water came from and how it flowed away along the gutters and through ditches and trenches. From the combination of continuous water level measurements, intensive flow rate measurements, soil level measurements, visual observations and the hydraulic model developed, a good understanding of the runoff in the Keutelbeek and the Strabeker Vloedgraaf water systems was obtained.

Sufficient insight and data had now been gathered to adequately address the research questions. Due to modifications made to the recently constructed rainwater buffer directly upstream of the Keutelbeek section during the experiments, measurements taken there could not be properly validated and evaluated in the same detail as in the Strabeker Vloedgraaf.

Experiments

For the experiments, first a selection was made from a series of locations where deep incisions had been observed, based on catchment area characteristics and the availability of data. Initially, the following experimental effect-oriented measures were implemented:

- augmenting gravel in the Keutelbeek;
- augmenting gravel in the Strabeker Vloedgraaf;

And subsequently in the Strabeker Vloedgraaf, installing:

- gravel mats;
- root barrier membrane (biodegradable cellulose).

The effects of these measures were then monitored until 12 November 2021.

Research results

The primary research results are:

- reliable data was obtained for the selected sections being researched including continuous water level measurements, flow rate measurements and soil level measurements;
- the characteristics of loess, loam and especially colluvium and with this the erosion resistance vary considerably, furthermore, bank erosion is exacerbated by frost;
- in the sections of the Keutelbeek being researched, the banks and stream bed consist of a less cohesive mixture of materials (mainly loess and loam), in the Strabeker Vloedgraaf the banks consist of a more cohesive mixture of loam and gravel and the stream bed mainly consists of gravel;
- the section in the Strabeker Vloedgraaf has larger peak discharges and a higher hydraulic stress than the section of the Keutelbeek, where the peak discharges are better suppressed;
- frequent overflows, discharges and runoff from paved surfaces were observed and measured, which resulted in peak discharges in the sections being researched;
- even though erosion also results from lower discharges, it is mainly the peak discharges that cause the most erosion, and particularly if these persist for longer;
- it is not the absolute amplitude of the flows, but the hydraulic stress or force: the combination of amplitude, duration and frequency as well as the timing, which determine the degree of erosion.

Conclusions

From the analysis of the research results and the synthesis, it can be concluded that:

- the gravel augmentation in the Keutelbeek remained stable until the extreme showers on 14 July 2021 when a localised flow diversion affected the toe of the embankment and the bank partially collapsed;
- the gravel augmentation in the Strabeker Vloedgraaf was not successful. This cannot be evaluated objectively because the augmented gravel in the Strabeker Vloedgraaf was disturbed very shortly before the peak discharge on 17 June 2020;
- the gravel mats and root barrier membrane placed in the Strabeker Vloedgraaf performed quite well, even after the peak discharges of 14 July 2021, until at least 12 November 2021;
- erosion has slowed, but these measures do not represent sustainable solutions for the long term. Large-scale source-oriented measures are therefore urgently required;
- overflows, discharges, and water runoff via paved areas have the greatest impact on erosion in the area studied in the site in the Strabeker Vloedgraaf and occur more often than expected and accounted for in policy.

Recommendations

It is recommended to take additional large-scale source-oriented measures as soon as possible. Some of these measures are already being implemented as part of the 'Water in Balance' project. However, it is not yet clear whether these are effective in the Keutelbeek and the Strabeker Vloedgraaf. Although it was not part of this research and this still needs further investigation, these source-oriented measures should result in:

- reduced runoff, fewer flash floods and prolonged peaks of water discharge, for example, more water storage in the sewerage system and further buffer optimisation;
- extending the time water remains in the buffers and only emptying buffers slowly so that discharge is gradual and does not lead to excessive and prolonged hydraulic stress on the vulnerable ecologically important streams;
- delayed rainwater drainage to and via the storm water trenches;
- encourage land owners and managers to install water infiltration and storage on site;
- increase storage of water via paved areas, for example between speed bumps, in gutters and make more efficient use of the buffering capacity of the sewerage system;
- channel unavoidable discharges (via sewerage pipes) to flatter areas further downstream.

For very valuable and vulnerable ecological communities of springs and streams, such as the rheophilic macrofauna and the valuable vegetation that is directly threatened, further study is required to determine whether reduced flooding will be sufficient and whether it is possible to eliminate the discharges altogether.

The influence of the deep incisions in nearby conservation areas in the stream valleys and banks has not been studied in depth because there were too few monitoring wells and no groundwater-dependent vegetation present. From the monitoring well in the experimental section of the Strabeker Vloedgraaf it transpired that the groundwater level was below the stream bed and there was no direct relationship between the groundwater and the water level in the stream. During the experimental measurements the stream water infiltrated the ground, this is an indication that good customised research is needed to determine to what extent the streams actually drain water from their surrounding environment.

The practical approach with short intensive monitoring can be used to gain better insight into the functioning of the water systems of streams and rivers such as the Geul, under various and also very extreme conditions.

Dankwoord

Mijn dank gaat uit naar alle leden van het deskundigenteam Heuvellandschap die als begeleidingscommissie functioneerde en in het bijzonder voorzitter Bart van Toorn (Natuurmonumenten).

Ook wil ik Gonzalo Campuzano Izquierda en Roel Dijkema bedanken voor het beschikbaar stellen van hun onderzoek, de uitwisseling van gegevens en gedachten en discussie. Davy Nelissen en Paul Gelissen voor de plezierige samenwerking en toelichting bij hun beheer- en onderhoudswerkzaamheden. Professoren Gerard Govers en Gert Verstraeten van de Universiteit van Leuven voor het interview, de literatuur en hun waardevolle aanwijzingen.

Verder gaat mijn dank uit naar het waterschap Limburg voor de toestemming om metingen te verrichten en experimenten uit te voeren in hun beken en op hun terrein.

Ook bedank ik de familie Lemmen (geheel bovenstrooms de Kleihaasdalervloedgraaf) en de familie Klein (benedenstrooms) voor hun aanwijzingen, foto's en films van gebeurtenissen die ik niet zelf heb kunnen waarnemen.

Tenslotte wil ik graag Wim Droessen, Edo Zaaijer en Jos Bonnemayer bedanken, die samen hebben gezorgd voor een goede start van dit uitdagende project, Sietze van der Linden en Rob Hubben voor de GPS-metingen en Siebe Bosch en Ralph Pieters Kwiers voor de review van dit rapport.

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling

Erosie is in Zuid-Limburg al lange tijd een probleem hoewel dit deels wordt veroorzaakt door natuurlijke processen, zoals de oppervlakkige afstroming van hemelwater. De laatste decennia is echter sprake van een toename van deze oppervlakkige afstroming en van de afvoerdynamiek in de beken. Dit is vooral toe te schrijven aan de toename van het verharde oppervlak, veranderingen in de riolering (inclusief afkoppelen) en intensivering van de landbouw. De afstroming van het hemelwater wordt minder gehinderd, waardoor het minder goed kan infiltreren en versneld wordt afgevoerd naar lager gelegen gebieden en beekdalen, vaak via de vloedgraven. Vooral de zomerse onweersbuien die gepaard gaan met extreme neerslaghoeveelheden leiden tot piekafvoeren in de beken waardoor de erosie en de insnijding worden versneld en versterkt. Deze onnatuurlijke snelle diepe insnijding kan leiden tot lokale veranderingen in de hydrologie langs de beken, waardoor de levensgemeenschappen die afhankelijk zijn van bron- en grondwater onder druk staan. Verder is men bezorgd dat de onnatuurlijke diepe insnijding van bronbeken in het Heuvelland leidt tot verlaging van de grondwaterstand, verdere erosie in de zijtakken en een sterke vermindering of zelfs het verdwijnen van kwel in het beekdal. Daarnaast leidt dit tot grote hydraulische stress, drift en verlies van habitat (substraat, blad) voor de in de beek levende organismen en met name de macrofauna. Ook kunnen veranderingen in het sedimenttransport en de waterkwaliteit optreden, waardoor kenmerkende (grondwaterafhankelijke) habitattypen zoals kalktufbronnen en soorten in en nabij de beek worden aangetast en op den duur zelfs kunnen verdwijnen.

Het probleem speelt in bijna alle (tientallen!) bronbeken in Zuid-Limburgse Natura 2000-gebieden met grondwaterafhankelijke habitattypen, te weten de Natura 2000-gebieden Geuldal, Geleenbeekdal, Bunder- & Elslooërbos en Noorbeemden & Hoogbos en is gekoppeld aan de habitattypen Kalktufbron (H7220), Kalkmoeras (H7230) en Alluviaal bos (H91E0C). Bovendien genieten bronbeken en de daaraan gebonden beekgemeenschappen bescherming onder de Europese Kaderrichtlijn Water en is de bescherming eveneens een speerpunt van het waterbeleid in de waterbeheerplannen, verdrogingsbeleid (GGOR) en zijn deze beken aangewezen als natuurbeek in het Provinciaal Omgevingsplan Limburg. Ook komen er veel Rode lijstsoorten voor (macrofauna, amfibieën, planten, e.d.).

Uit langlopend onderzoek in de Noor (Dijkma, 1998 en Campuzano, 2017) is gebleken dat daar de urgentie hoog is omdat de erosie heeft gezorgd voor het plaatselijk bijna geheel doorsnijden van een ondoorlatende laag onder de beek. Ook in recent uitgevoerd OBN-onderzoek naar hellingmoerassen (kalkmoeras) komt de ligging naast diep ingesneden bronbeken als belangrijk knelpunt naar voren (De Mars, 2017).

Er wordt al meerdere jaren onderzoek verricht en met oplossingsrichtingen geëxperimenteerd, ook elders in Nederland, maar daar ligt meestal geen watersysteemanalyse aan ten grondslag, zodat goede vergelijking niet mogelijk is. Bovendien zijn het reliëf en de bodemopbouw in Zuid-Limburg niet vergelijkbaar met andere hellende gebieden in Nederland. De aanpak van diepe insnijding vormt zodoende een kennislacune voor het Heuvelland, zo blijkt ook uit de preadviezen Beekdal-landschappen en Beekdalen Heuvellandschap (Aggenbach, 2009; Schaminée, 2009).

1.2 Doel van het onderzoek

Het doel van het onderzoek was het formuleren van maatregelen voor het duurzaam herstel van onnatuurlijk diep ingesneden beken in het Heuvelland. Op basis van gebiedskennis en ervaringen elders was al in een vroeg stadium duidelijk dat de toegenomen afvoerdynamiek en de effecten daarvan in principe alleen effectief en duurzaam kunnen worden gereduceerd door grootschalige brongerichte maatregelen. Hieraan wordt ook al jaren hard gewerkt door het Waterschap Limburg in samenwerking met de Provincie Limburg, terreinbeherende organisaties, gemeenten en de landbouw in het kader van het programma "Water in balans". Dit is positief, maar het zal nog de nodige tijd vergen en de tijd dringt. Daardoor zijn aanvullend op korte termijn ook effectgerichte maatregelen nodig. De nadruk lag daarom op effectgerichte maatregelen die zowel effect hebben op de natuurwaarden in de beek zelf als op de grondwater-afhankelijke natuur in de directe omgeving. De focus lag daarbij op de gebieden en natuurwaarden die zowel bescherming genieten op basis van Natura 2000, de Europese Kaderrichtlijn Water als de waterbeheerplannen van provincie en waterschap (natuurbeken).

Oorspronkelijk was de scope beperkt tot het zoeken naar uitsluitend effectgerichte maatregelen tegen diepe insnijding van heuvellandbeken, zoals ook blijkt uit de kennisvragen die in de volgende paragraaf worden beschreven. Daarnaast dienden als proef op de som experimenten te worden uitgevoerd met de meest kansrijke effectgerichte maatregelen. Het onderzoek naar de oorzaken en brongerichte maatregelen viel oorspronkelijk buiten de scope van het onderzoek. Maar gedurende het onderzoek werd duidelijk dat het bij watersysteemanalyse noodzakelijk is om ook te kijken naar de oorzaken. Zodoende is de scope verbreed en is globaal verkend welke brongerichte maatregelen oplossingen kunnen bieden. Deze mogelijke brongerichte maatregelen zijn daardoor wel minder gedetailleerd onderzocht en minder ver uitgewerkt.

Belangrijk is om te benoemen dat er meerdere oorzaken en vormen van erosie en insnijding zijn, zoals ook uitvoerig is beschreven in vakliteratuur (Poesen, 1993 en Boardman, 2006) en recent OBN-onderzoek in het kader van bufferstroken (De Waal, 2017), maar dat we ons hier beperken tot de fluviaatiele erosie in de beekbedding en de daarmee gepaard gaande diepe insnijding.

1.3 Kennisvragen

Het deskundigenteam Heuvellandschap is bezorgd dat de onnatuurlijke diepe insnijding van bronbeken in het Heuvelland leidt tot wijziging van de grondwaterstromingen, verlaging van de grondwaterstand, verdere erosie in de zijtakken en daarmee een sterke vermindering of zelfs het verdwijnen van kwel in het beekdal. Daarnaast veroorzaken piekafvoeren hydraulische stress voor de aanwezige levensgemeenschappen alsmede veranderingen in de waterkwaliteit en instroom van gebiedsvreemd materiaal. Hierdoor worden kenmerkende (grondwaterafhankelijke) habitattypen zoals kalktufbronnen en soorten in en nabij de beek aangetast en kunnen deze op den duur zelfs verdwijnen. Door klimaatverandering nemen de problemen in de toekomst nog verder toe.

Bovenstaande overwegingen hebben geleid tot de volgende kennisvragen.

Kennisvraag 1. Welke ervaringen zijn elders (in praktijk vooral in naburig buitenland) al opgedaan met het herstel van snelstromende, te diep ingesneden beken? En bieden deze ervaringen perspectief op een duurzaam herstel van de bronbekecosystemen in het Heuvelland?

Kennisvraag 2. Met welke effectgerichte (herstel)maatregelen valt de negatieve invloed van een onnatuurlijke insnijding te herstellen?

a) Wat zijn kansrijke maatregelen voor het herstel en hoe zijn die te vertalen naar snelstromende, diep ingesneden beken zoals aanwezig in de Zuid-Limburgse situatie? Zijn andere aanvullende maatregelen voor herstel te bedenken?

b) Welke maatregelen worden in de Zuid-Limburgse stroomgebieden reeds genomen om de oorzaken van te diepe insnijding te voorkomen? Zijn deze maatregelen afdoende (stand still) of zijn er andere of aanvullende maatregelen noodzakelijk? Ligt er een goede systeemanalyse aan ten grondslag?

c) Wat is de toepasbaarheid, effectiviteit en duurzaamheid van deze maatregelen, zowel rekening houdend met de aan grondwater gebonden habitattypen in de directe omgeving als aan de beekgemeenschappen. Onder welke voorwaarden zijn deze maatregelen toepasbaar?

Kennisvraag 3. Welke maatregelen kunnen aanvullend ingezet worden om hernieuwde insnijding van herstelde beken te voorkomen?

Het beantwoorden van deze vragen en het daartoe uitvoeren van experimenten stonden centraal in dit onderzoek. De antwoorden zijn opgenomen in hoofdstuk 6.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de onderzoeksstrategie, de methoden en de werkwijze beschreven waarbij direct ook concrete voorbeelden zijn genoemd. Hierin wordt de quickscan beschreven en hoe we gezamenlijk tot de keuze van de onderzoeksgebieden en -trajecten zijn gekomen. Ook wordt een korte samenvatting gegeven van de resultaten van de eerste fase van de watersysteemanalyse van de beken met diepe insnijding.

Hoofdstuk 3 gaat nader in op de meer gedetailleerde watersysteemanalyse van de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf, waar de onderzoekslocaties zijn gelegen voor het uitvoeren van de experimenten met de maatregelen.

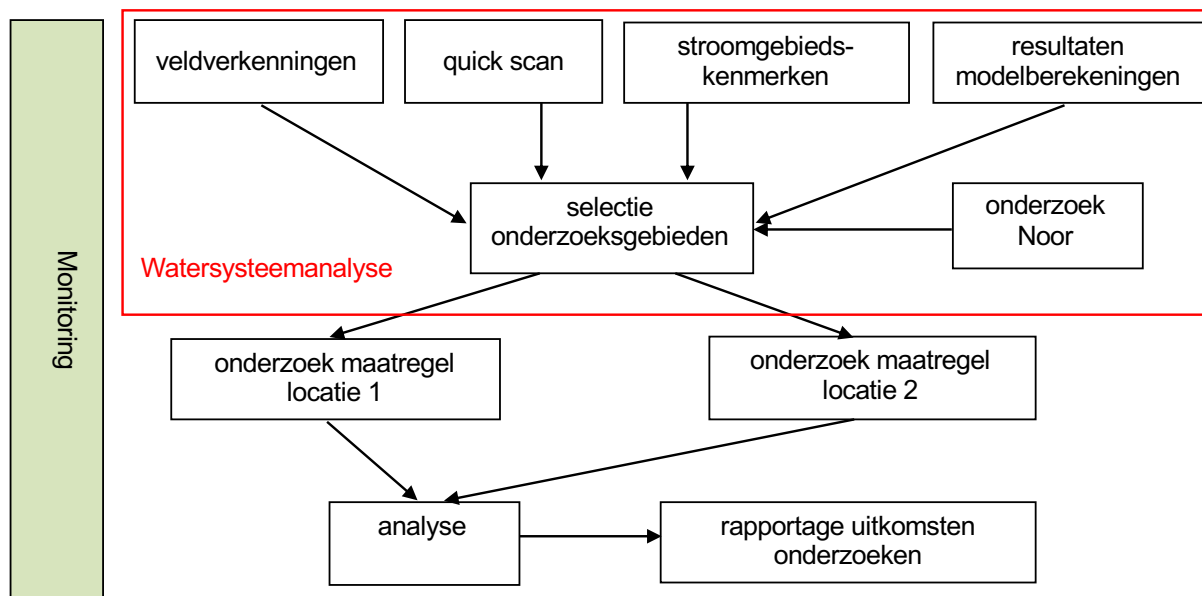
De resultaten van de monitoring van juli 2019 tot juli 2021 worden nader uiteengezet in hoofdstuk 4 en de experimenten worden besproken in hoofdstuk 5.

Hoofdstuk 6 betreft de synthese waarbij conclusies worden getrokken op basis van de onderzoeksresultaten en vergaarde inzichten en worden aanbevelingen gedaan voor acties op korte en langere termijn, gericht op de beheerders. Uiteindelijk worden de kennisvragen afzonderlijk beantwoord na de synthese.

2. Onderzoeksstrategie en methoden

2.1 Inleiding

De onderzoeksstrategie is afgestemd op de beschrijving van de aard van de opdracht en gericht op de beantwoording van de kennisvragen, waarvoor een watersysteemanalyse nodig was. Overeenkomstig de wensen van het deskundigenteam Heuvellandschap is een quickscan verricht, bestaande uit de inventarisatie van beschikbare kennis en ervaringen met maatregelen tegen diepe insnijding en interviews met deskundigen, specialisten en beheerders. Tegelijkertijd is gestart met veldverkenningen en met de inventarisatie van de stroomgebiedskenmerken en gegevens van de beken in de belangrijkste aandachtsgebieden, als eerste fase van de watersysteemanalyse. De nadruk is gelegd op de hydrologische en hydraulische processen die de neerslag-afvoer-relaties en de afvoerdynamiek van het stroomgebied bepalen. Daarvoor zijn de modelberekeningen van het Waterschap Limburg van het programma "Water in Balans", resultaten van LISEM-modellen, het onderzoek naar de stroombanen dat verricht is in het kader van het OBN-bufferonderzoek (De Waal, 2017) en natuurlijk het onderzoek in de Noor (Dijksma, 1995) bestudeerd.



Figuur 1.1. Schematische weergave onderzoeksstrategie.

Op basis van de resultaten van de quickscan en de eerste resultaten van de watersysteemanalyse zijn vervolgens samen met het deskundigenteam Heuvellandschap twee onderzoeksgebieden en locaties geselecteerd waar een gedetailleerde veldstudie en experimenten met de meest kansrijke maatregelen zijn verricht. Bij de selectie van de locaties voor de experimenten en de monitoring zijn de meest kritieke trajecten met de diepste insnijdingen gekozen, zodat sprake is geweest van een worst case benadering. Deze locaties zijn zodoende maatgevend en tevens representatief voor vergelijkbare beektrajecten elders (in Zuid Limburg).

Een zeer groot en belangrijk deel van dit onderzoek was de monitoring van de hydrologische en morfologische processen die vanaf het eerste begin tot het einde van het onderzoek heeft plaats gevonden.

Vervolgens zijn alle resultaten verwerkt, geïnterpreteerd en geanalyseerd en tenslotte vertaald naar conclusies en aanbevelingen.

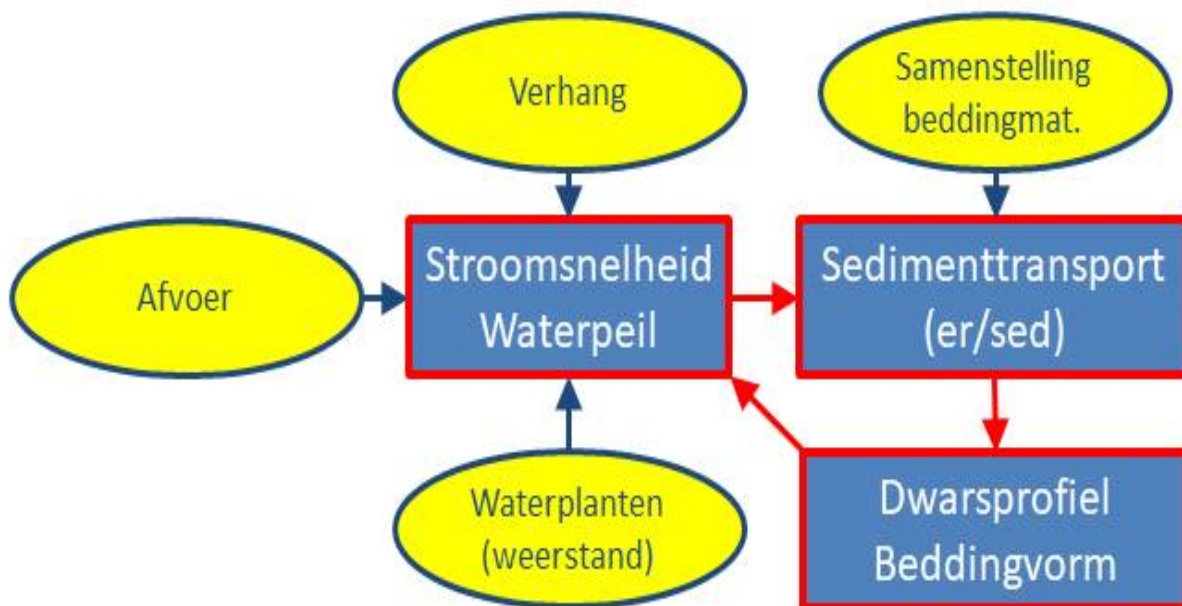
2.2 Watersysteemanalyse

Om beter inzicht te krijgen in de oorzaken en oplossingen voor de onnatuurlijke diepe insnijdingen van beken in Zuid-Limburg zijn gerichte watersysteemanalyses verricht. In eerste instantie is dit globaal verricht voor alle beken waarbij diepe insnijding is geconstateerd, waarbij wel het gehele stroomgebied van de beken in beschouwing is genomen. Na de selectie van de onderzoeksgebieden is een meer gedetailleerde watersysteemanalyse uitgevoerd waarbij de nadruk is gelegd op de gekozen onderzoekslocaties waar de experimentele maatregelen zijn uitgevoerd. Hiervoor is in de jaren '90 een methode ontwikkeld die gebaseerd is op het 5S-model van Beken Stroom (WEW, 1995). Deze methode is al veelvuldig toegepast en verder ontwikkeld voor watersysteemanalyses in het kader van de uitwerking van de ecologische sleutelfactoren hydrologie en morfologie voor stromende wateren van de STOWA (Reeze en Laseroms, 2018) en heeft veel overeenkomsten met de methoden die zijn toegepast bij het OBN-onderzoek integraal natuurherstel beekdalen (LESA) en de methode SESA die wordt toegepast bij waterschap Limburg.

Een integrale watersysteemanalyse maakt het mogelijk en/of eenvoudiger om:

- op gestructureerde manier te werken, een watersysteemanalyse kan dienst doen als kapstok voor onderzoek, planvorming, ontwerp en beheer;
- inzicht te krijgen in de processen en terugkoppelingsmechanismen die zich in het watersysteem plaats vinden, en in de onderlinge relaties tussen variabelen en de sturende factoren;
- inzicht te krijgen in de knelpunten en de kansen, en in oorzaken en gevolgen;
- beter gefundeerde oplossingsrichtingen te signaleren;
- de effectiviteit en de duurzaamheid van maatregelen te bepalen en de representativiteit .

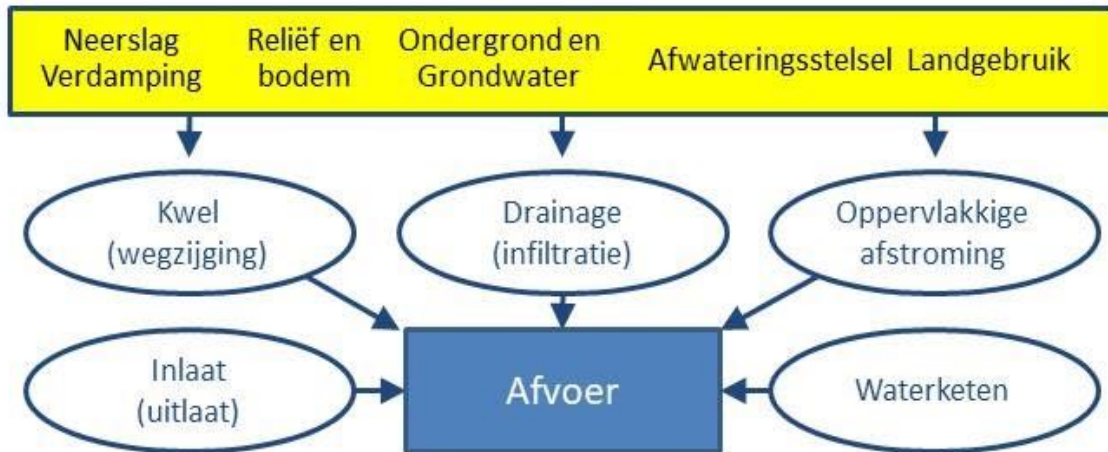
De kern van de methode voor de watersysteemanalyse is dat deze voort bouwt op de samenhang tussen systeemvoorwaarden, parameters/ toestandsvariabelen en processen zoals omschreven in onderstaande figuur.



Figuur 2.1. Conceptueel model of relatieschema (Reeze en Laseroms, 2018)

De stuurfactoren afvoer, verhang, samenstelling van het beddingmateriaal en de ruwheid (t.g.v. vegetatie en/of obstakels in de waterlopen) bepalen de variabelen stroomsnelheid, sedimenttransport, profielvorm en bodemligging. In dit systeem zijn diverse terugkoppelingsmechanismen aanwezig. Zo treedt een afname van de stroomsnelheid op als het dwarsprofiel groter wordt of het verhang afvlakt. Het is belangrijk te beseffen dat stuurfactoren en volgvariabelen dynamisch zijn, en dus veranderlijk in tijd en ruimte. Ze moeten dan ook 'dynamisch' worden beschreven, dus als functie van ruimte en tijd. Hierbij kan handig gebruik worden gemaakt van hydraulische modellen.

Bij de watersysteemanalyse is het watersysteem integraal beschouwd en met nadruk op de samenhang tussen het stedelijke watersysteem (inclusief riolering), het grondwater- en het oppervlaktewatersysteem en in een later stadium de effecten op het sedimenttransport en de morfologie van de beek, in combinatie met vegetatieontwikkeling. Dit laatste is namelijk eigenlijk alleen zinvol als de hydrologische en hydraulische processen (afvoerdynamiek en stroomsnelheidsverschillen) voldoende kunnen worden gekwantificeerd.



Figuur 2.2. Afvoer, afvoercomponenten en systeemkenmerken die de afvoer bepalen.

Voor de watersysteemanalyse en het bepalen van de afvoerdynamiek is in eerste instantie getracht gebruik te maken van de bestaande modellen van het Waterschap Limburg uit het programma "Water in balans" en deze te koppelen aan de tijdreeksanalyse van peilbuismetingen, waterstandsmetingen, debieten en de neerslag. Hiermee zouden de relaties tussen het water in de beek en het grondwater kunnen worden bestudeerd. Het grote voordeel van toepassing van modellen (mits die het systeemgedrag kunnen benaderen) is dat daarmee historische en ook toekomstige scenario's zijn te beschouwen, inclusief verdere klimaatverandering en het effect van bron- en effectgerichte maatregelen in het landelijke en stedelijk gebied.

Het proces ten behoeve van de watersysteemanalyses bestond uit de volgende activiteiten:

1. inventarisatie van stroomgebiedskenmerken en beschikbare meetgegevens inclusief de interpretatie van de bruikbaarheid en kwaliteit van de data;
2. bestudering van de resultaten van het modelonderzoek van het Waterschap Limburg en van de WUR;
3. globale (GIS-)analyses, het landelijk en stedelijk oppervlaktewatersysteem, de geohydrologie en de riolering;
4. bepaling van de samenstelling van de beekdalbodem en het beddingmateriaal uit de geologische kaart, de geomorfologische kaart en de bodemkaart, het BRO, DINO-loket, PDOK en gegevens van het Waterschap Limburg en de WUR;
5. GIS-analyse van het grondgebruik en (de toename van) verharde oppervlak en van het drainage- en afwateringssysteem in de tijd;
6. goed voorbereide stroomgebiedsverkenning(en), samen met medewerkers van het OBN, waterschap en de terreinbeherende instanties;
7. plaatsing van extra dataloggers voor eigen aanvullende peilmetingen;
8. bemonstering en visuele determinatie van de samenstelling van het beddingmateriaal, inclusief een beschrijving van de stabiliteit;
9. zeer gerichte interviews en overleg met medewerkers en experts met gebieds- en systeemkennis;
10. tijdreeksanalyse van de meetgegevens, debieten, peilen en bodemveranderingen;
11. inmeting van de geometrie van de bedding en plaatsing van erosiebouten;
12. bestudering van verandering in de geometrie van de bedding, dwars- en lengteprofielen en andere indicatoren voor erosie;
13. het berekenen van de hydrologische en hydraulische effecten van de afvoerdynamiek met de modellen met als resultaat peilen, gemiddelde stroomsnelheden en ruwheden bij diverse (piek)afvoeren en eventueel, indien nodig en mogelijk berekening van het sedimenttransport;
14. synthese van alle bovenstaande activiteiten en analyses.

Reeds in een vroeg stadium van de watersysteemanalyse is gebleken dat de bestaande modellen van "Water in Balans" ongeschikt waren voor het onderzoek en onvoldoende beschikbare (meet)-gegevens waren van debieten, waterstanden, stijghoogten en de historie van het grondgebruik. Hierdoor zou geen kwantitatieve watersysteemanalyse kunnen worden verricht en het rendement beperkt zijn. Daarom is besloten de onderzoeksopzet bij te stellen en meer en intensiever te gaan monitoren zodat deze gegevens uiteindelijk wel beschikbaar zouden komen en een kwantitatieve benadering mogelijk werd.

Daarnaast heeft de Corona-pandemie een grote invloed uitgeoefend op het veldonderzoek en de experimenten omdat daardoor geen fysieke bijeenkomsten mogelijk waren met de betreffende medewerkers van de betrokken organisaties en er veel verstoring was in de onderzoekstrajecten door de toename van recreanten. De grote lijnen zijn nog steeds gevolgd maar stappen 3, 4, 5 en 6 zijn daardoor beperkt uitgevoerd.

2.3 Veldverkenningen

Om goed inzicht te krijgen in de diepe insnijdingen in de regio zijn in februari en maart 2019 diverse veldverkenningen verricht. Daarbij zijn de beken bezocht met volgens de beheerders de grootste insnijdingen. Dit betroffen onder andere de:

- Noor;
- Hussebeek;
- Hermensbeek;
- Klitserbeek;
- Strabeker Vloedgraaf;
- Keutelbeek.

Van deze veldverkenningen zijn fotorapportages en verslagen gemaakt, onderstaande foto's geven een duidelijke indruk van de problemen.



Hussebeek, overstort en goot als bron



Grote grasbetonblokken hielpen niet



Leukderbeek (voetpad Armenbosch)



Een pad met te kleine goot

Uit de waarnemingen en foto's bij de Hussebeek en de Leukderbeek blijkt dat zelfs constructieve voorzieningen en maatregelen niet zijn opgewassen tegen de erosie door snel afstromend water. Bij andere beken, zoals de Klitserbeek, Hermensbeek en Mechelderbeek waren minder duidelijke aanwijzingen voor diepe insnijdingen. In bijlage 1 zijn de locaties van de veldverkenningen en diepe insnijdingen weergegeven.



Klitserbeek, benedenstrooms een duiker



Hermensbeek, minder duidelijk zichtbaar



Berghorsbeek



Strabeker Vloedgraaf

Een opvallende constatering was dat de diverse beheerders verschillende definities en kwalificaties van diepe insnijding hadden, die sterk afhankelijk waren van de locaties en de oorzaken. Sommige gevallen waren zeer duidelijk zichtbaar terwijl bij andere gevallen amper duidelijk was welke locaties het betrof.

Al snel werd duidelijk dat de meeste en de meer extreme insnijdingen werden waargenomen bij kunstwerken zoals overstorten, lozingen en duikers. Ook was duidelijk dat lokale omstandigheden en vooral de verschillen en overgangen in de helling, de vegetatie en de bodemopbouw een grote rol speelden.

Eerdere ervaringen

Bij enkele beken zijn tijdens de veldverkenningen ook sporen gevonden van eerder uitgevoerde experimenten en maatregelen, zoals houtpakketten en er zijn ook enkele bekende ervaringen genoemd.

In de Noor, de Strabeker Vloedgraaf, de Keutelbeek en de Hulsbergerbeek hebben in het verleden al enkele experimentele maatregelen plaats gevonden. Met uitzondering van de Noor zijn daarvan echter geen meetgegevens en nadere informatie beschikbaar gekomen.

Houtpakketten in de Noor (2010, 2017)

In de Noor zijn in het verleden (in 2010) houtpakketten aangelegd in de beek, in de lengterichting. In 2017 is in ditzelfde traject een experimenteel onderzoek uitgevoerd door Gonzalo Campuzano Izquierdo, waarbij grindsuppleties zijn toegepast die zijn bedekt door houtpakketten. Of dit goed heeft gewerkt is niet nader onderzocht omdat de Noor buiten de scope is komen te vallen. De waarnemingen tijdens veldverkenningen gedurende de quickscan waren niet zo positief.



Noor, overstort



Gezakt houtpakket, ruimte tussen beugel



Water loopt langs grind en houtpakket



Idem, met zichtbare teenerosie



Vervallen meetstuw



Vervallen meetstuw, geheel onderloops

Hulsbergerbeek (2017)

In de Hulsbergerbeek is het grootschalig aangepakt en is de diep ingesneden beekbedding in 2017 over een lengte van honderdvijftig meter, circa 1.5 meter diep, gedeeltelijk gedempt met een mengsel van grote stenen en klei. Daar is ook een kleine bypass gegraven die verdedigd is met stenen. Gedurende het onderzoek is de Hulsbergerbeek nog enkele keren bezocht en er zijn tot juli 2021 geen waarnemingen gedaan die duiden op grote erosie, hoewel de stenen duidelijk zichtbaar waren geworden. Voor de macrofauna heeft het echter voor zover bekend nog niet geleid tot een positief effect, maar dat kan meerdere oorzaken hebben.



Gedeeltelijk gedempte bedding



Bypass met stenen

Keutelbeek (ca 2010)

In de Keutelbeek zijn in enkele trajecten maatregelen met stenen en houtpakketten aangetroffen. Deze lijken te zijn uitgevoerd in het kader van de GGOR studie in 2010, maar dat kon niet worden bevestigd. De Siepen- en Gijsbergervloedgraaf is gedeeltelijk voorzien van tegels en zelfs zetsteen tot de insteek. Dit leidt bij de monding in het bos tot een bodemval en een diepe stroomkuil.



Figuur 2.3. Activiteiten ikv GGOR-studie uit 2010 in de Keutelbeek.



In beton gezette stenen tot de insteek



Houtpakket onderloops

Er lijken diverse uitvoeringswijzen te zijn toegepast bij het aanbrengen van de stenen, veelal liggen ze los, deels in verband en af en toe zijn de stenen in beton vastgelegd, desondanks zijn er overal sporen van erosie en achter- en onderloopsheid. Het water lijkt tussen de stenen door te sijpelen en daarnaast zijn benedenstrooms de stenen vaak spoelgaten en stroomkuilen ontstaan.

Strabeker Vloedgraaf (ca 2010)

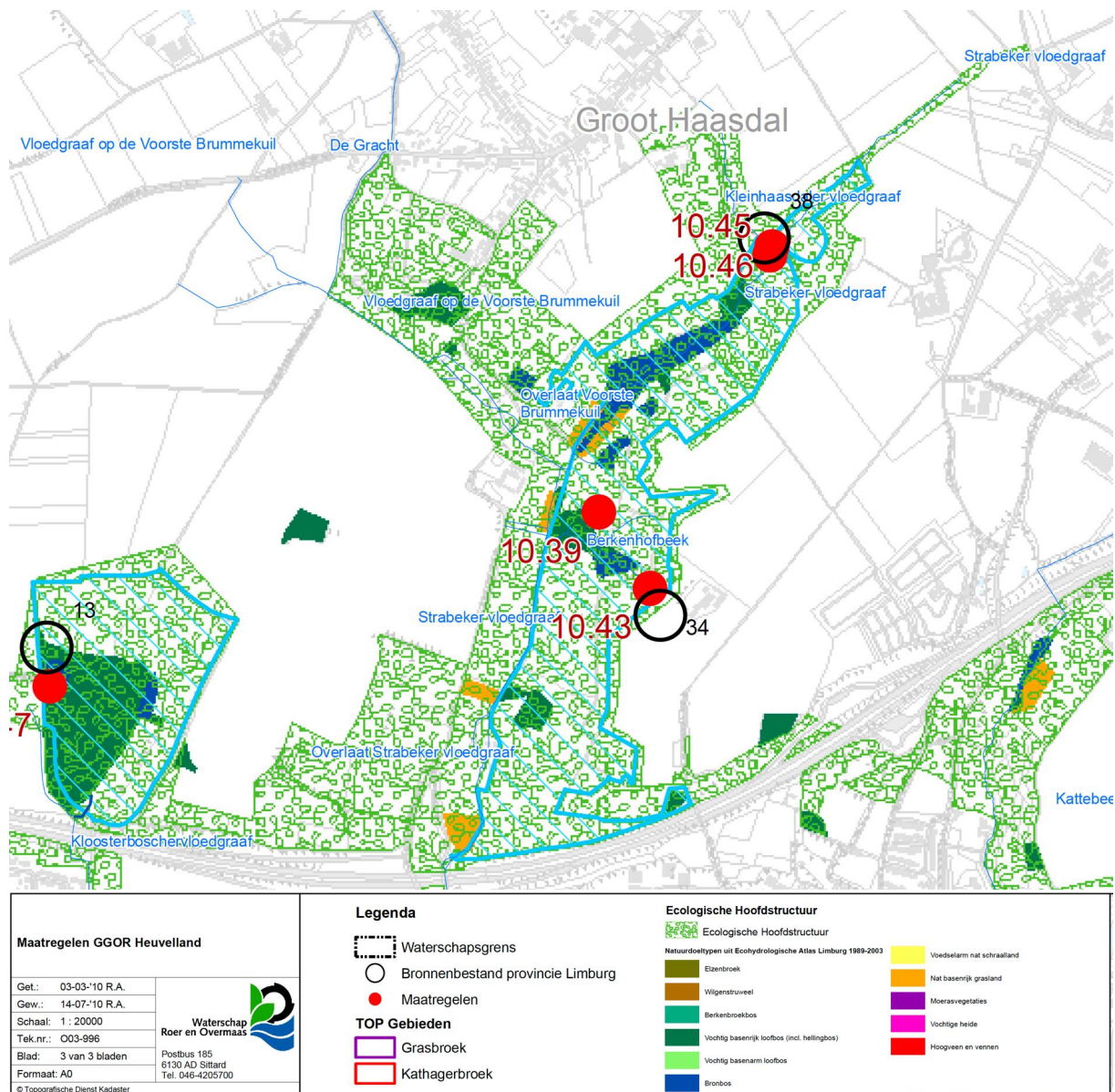
In de bovenstrooms gelegen trajecten van de Strabeker Vloedgraaf zijn op meerdere plaatsen stroken met (soms in verband) aangelegde of gestorte stenen aangetroffen. Deze zijn duidelijk zichtbaar omdat het water tussen de stenen door is gelopen zodat ze onderloops zijn geworden. Niet duidelijk is geworden wanneer die zijn aangelegd en door wie. Het heeft in ieder geval niet of mogelijk contraproductief gewerkt. Het aanbrengen van objecten leidt vaak tot grotere overgangen en een grotere turbulentie waardoor fijn materiaal uit kan spoelen.



Aangelegde stenen (6475)



Stroomkuil benedenstrooms stenen (6476)



Figuur 2.4. Activiteiten ikv GGOR-studie uit 2010 in de Strabeker Vloedgraaf.

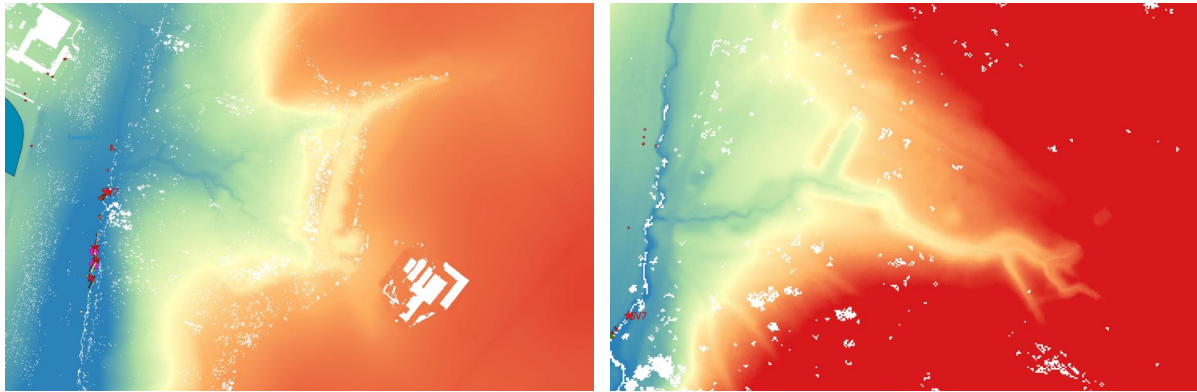
De indicaties van eerdere experimenten kwamen niet geheel overeen met de in de bovenstaande figuur opgenomen punten. Blijkbaar zijn er ook activiteiten geweest in de Berkenhofbeek.

In de bovenstrooms gelegen delen in het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf zijn op diverse plaatsen erosiegaten waargenomen, waar het water ondergronds wegstroomt en sijpelt. Dit zouden oude hopen kunnen betreffen van b.v. vossen of dassen, maar het kan ook duiden op preferente stroombanen door een iets afwijkende bodemsamenstelling. In andere gebieden zoals de Noor is gesignaleerd dat meetschotten voor debietmeting snel onder- en achterloops zijn geworden.

Wegen en paden vormen preferente stroombanen en snelle afvoerroutes voor afstromend water en sediment. Met name op steile hellingen kunnen wegen en paden van grote invloed zijn op erosieprocessen.

In het Ravensbosch heeft in het verleden ook winning van leem, mergel en grind plaats gevonden (Renes, 1989). De hoogtegegevens in AHN2 en AHN3 tonen ook deelgebieden, zoals in het stroomgebiedje van de Berkenhofbeek, met zeer sterke overgangen die waarschijnlijk geen natuurlijke oorzaken hebben. Het OBN-onderzoek naar bufferstroken (De Waal, 2017) vermeld in dit gebied ook antropogene invloeden en de doorbraak van een walletje. Ook uit bestudering van de

historische kaarten is gebleken dat er veel activiteiten hebben plaats gevonden in het dal van de Berkenhofbeek.



Figuur 2.5. Hoogtegegevens van de Berkenhofbeek (zijbeek van de Strabeker Vloedgraaf).

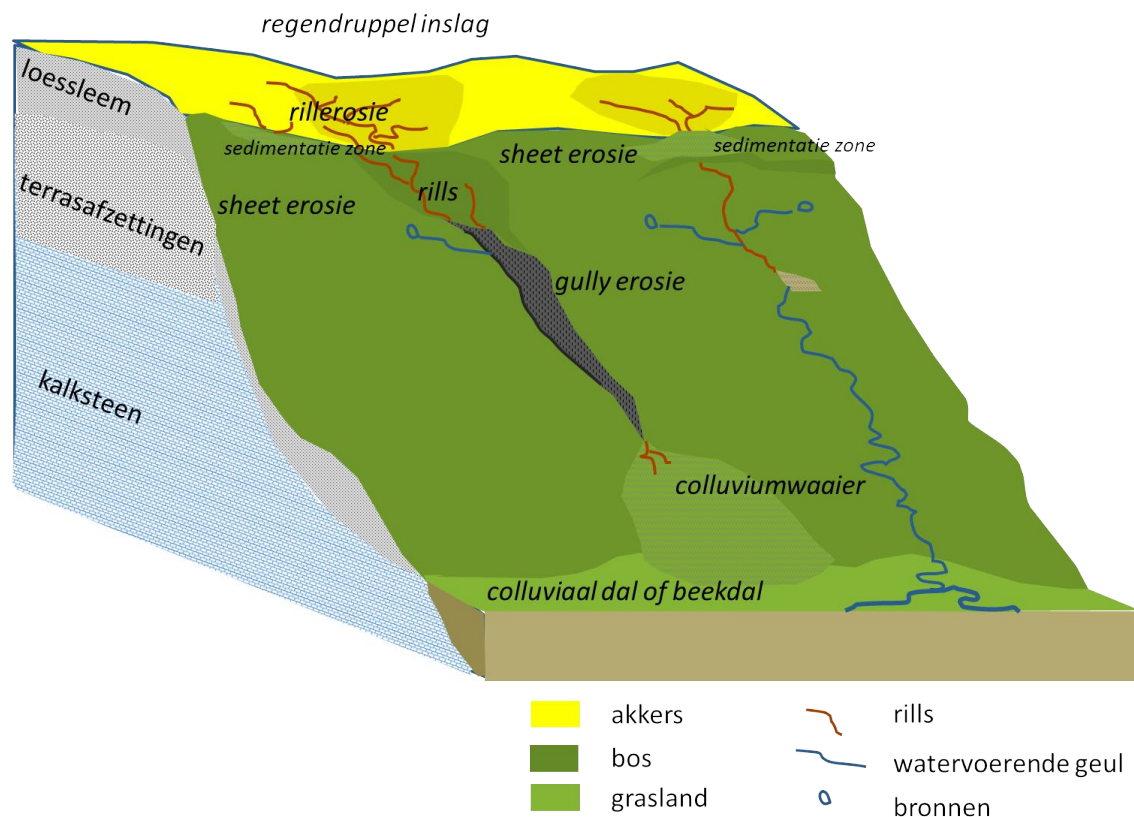
Er zijn zeker lokaal grote verschillen in erosie, afhankelijk van locatiespecifieke omstandigheden. De natuurlijke helling- en erosieprocessen spelen overall, zijn redelijk te doorgronden en leveren geleidelijke overgangen. De antropogene invloeden leiden meestal tot hoekige, grillige vormen en scherpe overgangen. Dergelijke locaties met sterk antropogene beïnvloeding kunnen zeker onder extreme condities heel anders en grillig reageren en leiden tot grotere erosie dan bij minder sterk antropogeen beïnvloede locaties.

2.4 Quick scan

De quickscan bestond uit gericht literatuuronderzoek naar fluviale erosie en interviews met geselecteerde wetenschappers en deskundigen met ervaringen met diepe insnijdingen in Zuid-Limburg, België en Duitsland. Daarbij zijn ook de leden van de deskundigenteams Heuvellandschap en Beekdallandschap en de aangewezen medewerkers van de betrokken partijen benaderd. Daaruit zijn helaas geen concrete tips en ideeën gevolgd voor meer literatuur en de interviews met andere wetenschappers en deskundigen. Er zijn daarbij wel enkele experimenten genoemd in andere regio's zoals Kastanjeberg in Beek-Ubbergen en de Springendalsebeek, maar daar zijn de hellingen en de bodemopbouw sterk verschillend. Bovendien zijn van deze experimenten geen nadere gegevens beschikbaar gesteld. Tegelijkertijd zijn vragen gesteld en discussies gestart in openbare internationale netwerkgroepen en is bij eigen netwerken geïnformeerd.

In Europa is veel onderzoek verricht naar het ontstaan, de processen en de gevolgen van diverse vormen van erosie (Poesen, 1993, Boardman, 2006, De Waal, 2017 en Verstraeten, 2019), maar veel minder naar de meer permanente erosie en insnijding van beekbeddingen. De geulerosie (gully erosion) komt nog het meest overeen met de fluviale erosie en diepe insnijding van beekbeddingen maar is in Europa ook niet zo frequent onderzocht. Goede uitvoerig gedocumenteerde experimenten of evaluaties van maatregelen zijn nog zeldzamer. Het onderzoek van de Universiteit in Leuven in het Kinderveld (Verstraeten, 2017 en Steegen, 2020) en de experimenten in de Noor (Dijksma, 1995 en Campuzano, 2017) zijn in feite de enige bruikbare informatiebronnen. Bij beide onderzoeken bleven er echter ook nog niet beantwoorde vragen over die doorslaggevend zijn om uitspraken te doen over de mate van effectiviteit, met name op langere termijn. Ondanks dat in deze onderzoeken fluviale erosie beperkt is meegenomen waren ze toch erg nuttig, informatief, en inspirerend.

Ook bij recent OBN-onderzoek naar erosie en bufferstroken in Zuid-Limburg (De Waal, 2017) is de fluviale erosie in de beekbedding helaas buiten beschouwing gebleven. De oorzaak hiervoor is niet duidelijk, mogelijk is dit gelegen in de beperkte kennis omtrent de fysische, bodemkundige, hydrologische en hydraulische processen en de interactie en relaties daartussen.



Figuur 2.6. Diagram van een helling langs een met löss bedekt plateau zoals dit veelvuldig in Limburg voorkomt met diverse vormen van erosie. Ten noorden van de Geul is er sprake van een dikker lösspakket en komt de kalksteen vrijwel nergens aan het oppervlak. In de zone met terrasafzettingen (terraskleien) komen bronniveaus voor. (De Waal, 2017).

Het onderzoek naar bufferstroken bood overigens wel diverse aanknopingspunten en veel inzicht, met name met betrekking tot de afvoer uit het landelijke gebied. Sterk punt van dit rapport is de beschrijving van de diverse verschijningsvormen van erosie vanaf de terrassen naar de Natura 2000 gebieden. Er is ook een methode beschreven om de erosiegevoeligheid te bepalen. Helaas is daarbij vooral gefocussed op de (natuurlijke) afstroming van de randen van de plateau's en is de schaal van de erosiegevoeligheidskaarten te grof om goed onderscheid te maken tussen de diverse deelstroomgebieden en afwateringseenheden.

Uit onderzoek in Vlaamse rivieren (Beel, 2006) is gebleken dat de toepassing van brongerichte maatregelen, zoals minimale bodembewerking, op een groot areaal kan leiden tot een reductie van 65 % op de sedimentaanvoer. Verder kunnen symptoomgerichte maatregelen, zoals erosiepoelen en grasbufferstroken, de sedimentaanvoer sterk reduceren. Deze maatregelen bieden ook een efficiënte bescherming tegen modderstromen, en zullen ook daarna een extra beveiliging vormen bij uitzonderlijk zware regenval.

Uit de interviews en de bovengenoemde literatuur is wel duidelijk geworden dat beddingerosie en diepe insnijding alleen kan worden voorkomen indien maatregelen worden toegepast die:

- oppervlakkige afstroming reduceren;
- infiltratie bevorderen;
- de erosieweerstand vergroten;
- de turbulentie en schuifspanningen reduceren.

Of op een bepaald moment erosie of sedimentatie plaats vindt wordt voornamelijk bepaald door de verhouding tussen de hoeveelheid sediment die bovenstrooms wordt aangevoerd en de sedimenttransportcapaciteit en de beschikbaarheid van sediment in de bedding.

Beddingen en insnijdingen worden in het algemeen dieper in beken met oevers van meer cohesieve materialen, omdat steilere taluds mogelijk zijn (Schumm, 1977). Ook de hoeveelheid en de samenstelling van het getransporteerde sediment is van invloed. Dit en zowel de bodemopbouw als de samenstelling van het beddingmateriaal kunnen ruimtelijk en temporeel sterk verschillen.

De indruk was dat met name de combinatie van langdurige droogte gevolgd door een korte zeer hoge neerslagintensiteit van invloed is op de fluviatiele bodemerosie en de insnijding. De frequentie van deze scenario's lijkt toe te nemen. Dit leidt ook tot een afname van de grondwateraanvulling waardoor de grondwaterstanden ook structureel zullen blijven dalen.

Er zijn momenteel ook vergelijkbare onderzoeken en experimenten gaande in de grote rivieren. Zo worden in de Boven Rijn onderzoeken verricht en experimentele maatregelen uitgevoerd om de zogenaamde "autonome bodemdaling" van de vaargeul en het zomerbed te reduceren en om het effect de harde laag in de Boven Rijn bij Spijk (bij Lobith) aan te passen. Hoewel de processen en de maatregelen mogelijk vergelijkbaar kunnen zijn is geen goede vergelijking mogelijk met het Zuid-Limburgse heuvelland.



Erosiepinnen



Erosiebouten



Grindmatje met sediment



Strookje sylex (gebroken vuursteen) als tracer

Naast de zoektocht naar kennis, ervaringen en experimenten is ook (literatuur)onderzoek verricht naar (innovatieve) monitoringmethoden. Een voorbeeld zijn de erosiepinnen die in de Noor zijn toegepast. Uit bestudering en evaluatie daarvan is geconstateerd dat daarbij te veel verstoring op kan treden door takken en andere drijvende materialen die worden opgevangen.

Op basis van deze ervaringen zijn eerst zeer kleinschalige experimenten met monitoringmethoden verricht, onder andere in de Noor. Dit betrof experimenten met erosiebouten, grindmatjes en het plaatsen van kleinschalige opvallende objecten als eenvoudige verklikkers of tracers bijvoorbeeld bij de monding van de overstort en andere buizen. Ook gedurende het vervolg van het onderzoek zijn kleinschalige experimentele monitoringmethoden toegepast.

Om getransporteerd sediment op te vangen en daarvan de textuur en korrelgrootte te bepalen zijn enkele grindmatjes toegepast. Deze bleken effectief als indicator, maar werden bij piekafvoeren meegevoerd. Daarom zijn ze in een later stadium verankerd.

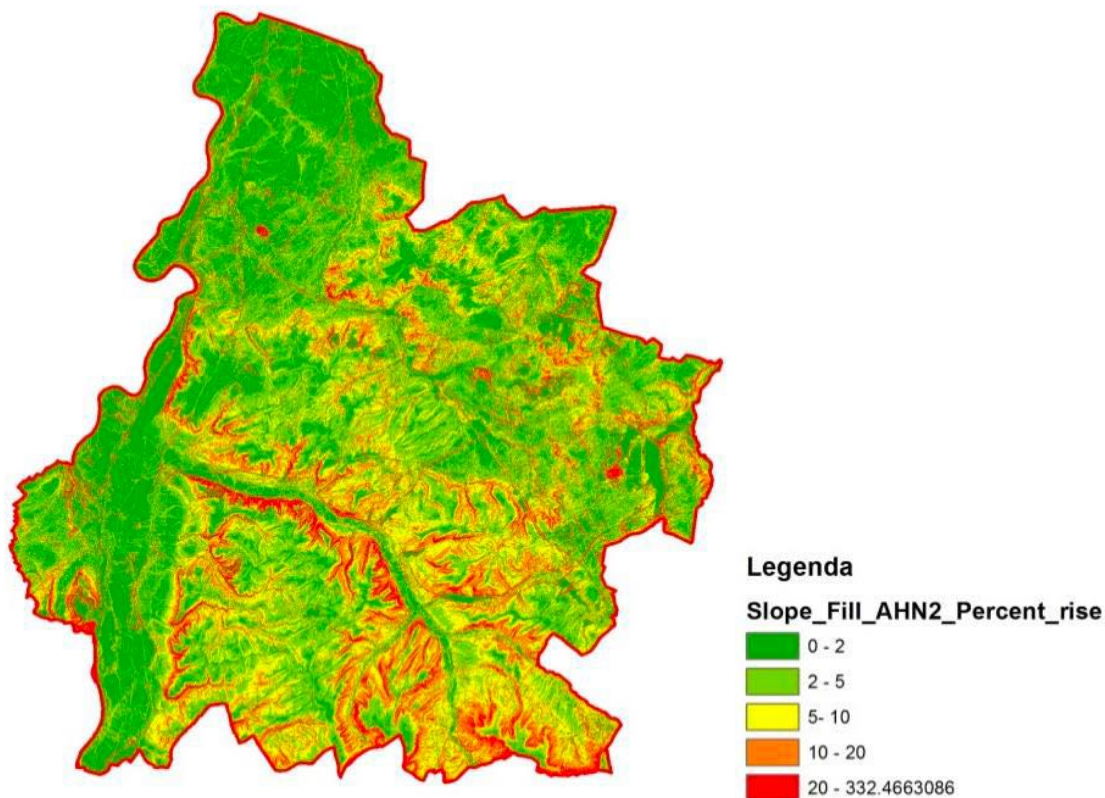
2.5 Stroomgebiedskenmerken

Bij de inventarisatie en bestudering van stroomgebiedskenmerken van de beken met bekende diepe insnijding bleek al snel dat er weinig gegevens beschikbaar waren van de stroomgebieden, zoals (GIS-)kaarten en gegevens van het bodemgebruik, verharde oppervlakken en teelten. Daarom is dit beperkt gebleven tot de globale bestudering van de ligging van waterlopen, bronnen, lozingen, overstorten, historische kaarten, hoogtekaarten van het AHN en de hellingen.

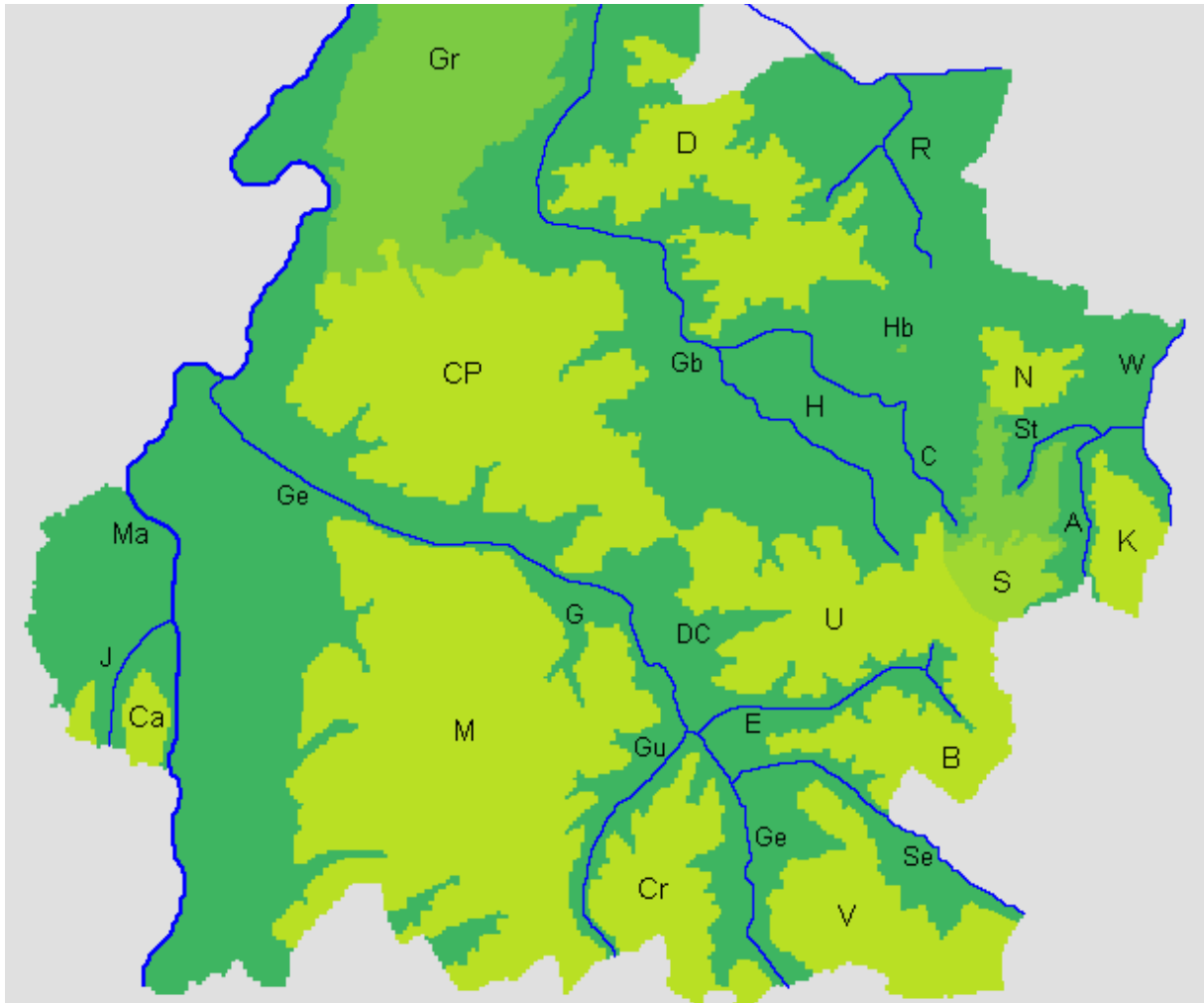
Geo(morfo)logie

De stroomgebiedskenmerken van de beken met diepe insnijding in het Zuid-Limburgse heuvelland hangen nauw samen met de kenmerken van de diverse plateau's en de hellingen. Voor de beken ten zuiden van de Geul zijn het de plateau's van Margraten, Crapoel en Vaals, voor de beken ten noorden van de Geul zijn dit het Centraal Plateau (plateau van Schimmert) en het plateau van Ubachsberg. Het plateau van Margraten heeft vrijwel overal steile hellingen terwijl het plateau van Schimmert steil is aan de zuidzijde naar de Geul, maar veel geleidelijker aan de noordzijde naar de Geleenbeek. De plateaus zelf zijn relatief vlak en bedekt door een laag löss. Op de beekdalflanken met steile hellingen komen vooral löss- en afbraakwanden voor. De beekdalen die deels droog, deels intermitterend en deels permanent watervoerend zijn bestaan vooral uit de verspoelde resten van de holocene erosie van de terrassen en hellingen, het zogenaamde colluvium. Dit betreft een heterogeen mengsel van grind, zand, vuursteen en fragmenten van gecementeerde afzettingen. De lösslaag die tijdens de voorlaatste en laatste ijstijd door de overwegend noordwestenwind op de plateau's werd afgezet (Formatie van Boxtel) varieert van drie tot tien meter dik. De bovenste laag van de löss is meestal gedeeltelijk ontkalkt, maar dikkere afzettingen kunnen aan de basis nog steeds sterk kalkhoudend zijn (Stiboka, 1990). Deze kalk wordt beschouwd als oorsprong van het hoge kalkgehalte van de brongebieden in dit deel van Zuid-Limburg.

Onder deze lösslaag komen op veel plekken pleistocene terrasafzettingen van de Maas voor van de Formatie van Beegden. Deze terrasafzettingen bestaan overwegend uit grof zand en grind, maar lokaal kunnen ook (humeuze) klei- en veenlagen voorkomen. Daar onder bevindt zich de formatie van Rupel bestaande uit afwisselend zand- en slecht doorlatende kleilagen. Waar deze kleilagen dagzomen treedt vaak grondwater uit en zijn bronnen gelegen. Een voorbeeld hiervoor vormt de Carexweide in het Ravensbos in het deelstroomgebied van de Berkenhofbeek. Dieper worden de klei- en zand-afzettingen van de Formatie van Tongeren en de kalksteen van de Formatie van Maastricht aangetroffen.



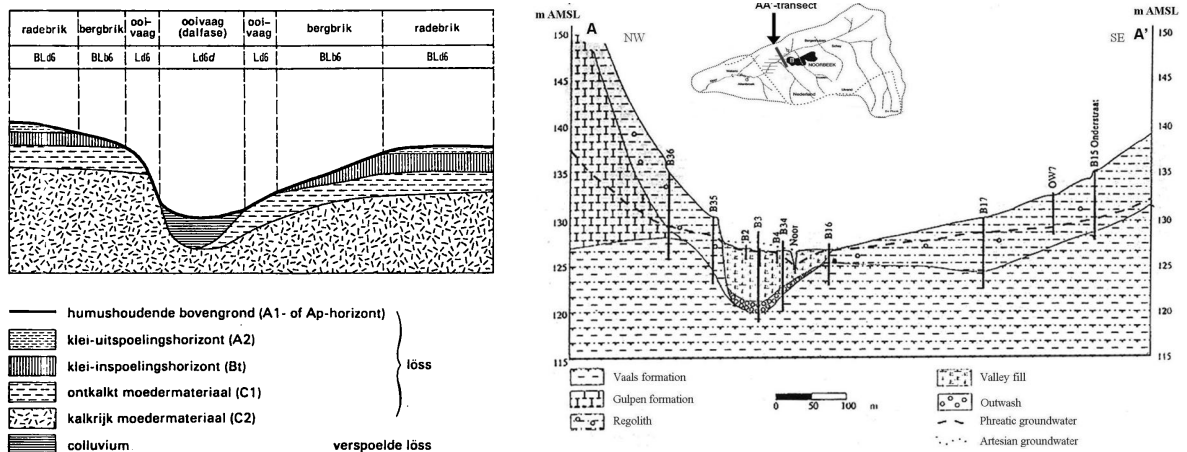
Figuur 2.7. Hellingkaart (De Waal, 2017)



Figuur 2.8. De plateau's en beekdalen van Zuid-Limburg.

Bodemopbouw

De bodemopbouw van de bovengrond en met name de samenstelling van de beekbedding zijn van zeer grote invloed op de mechanismen en de mate van beddingerosie en insnijding. In de hellende lössgronden komen met name radebrik-, bergbrik- en ooivaagbodems voor en in de beekdalen vooral ooivaagbodems. Uiteraard speelt ook het bodemgebruik en het beheer en onderhoud van de stroken langs de beken een grote rol bij de erosie en de stabiliteit van de beekbeddingen.



Figuur 2.9. Typische dwarsprofielen van een dalopvulling, rechts de Noor (Dijksma, 1998)

De steile hellingen, de slechte doorlatendheid van löss en leem en de heterogeniteit van de beekdalbodem leiden tot een zeer grote erosiegevoeligheid van de toplaag, met name wanneer vegetatie beperkt is of ontbreekt.

Watersysteem

De watersystemen en de hydrologie van de heuvellandbeken met diepe insnijding zijn verkend door de ligging van de beken ten opzichte van de hoogtekarten en de geologische bodemopbouw te bestuderen. Daarbij is getracht de relaties tussen de ligging van de beken en de hydrologische gegevens zoals locaties met peilfilters te leggen, maar daarvoor waren de meeste filters te diep. Het plaatsen van additionele peilbuizen met freatische filters zou veel extra informatie kunnen opleveren en is overwogen, maar viel buiten de scope van het onderzoek. Uiteindelijk is in een later stadium alleen een extra peilbuis geplaatst bij de Strabeker Vloedgraaf.

Om meer inzicht te krijgen in de processen en het systeemgedrag van de heuvellandbeken met diepe insnijding zijn in reeds in juli 2019 tijdelijke meetpunten ingericht in de Noor, de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf. Qua systeemgedrag en processen ging het voornamelijk om:

- de afvoerdynamiek, het verloop van de afvoer in de tijd en de verandering daarin;
- de frequentie en hoogte van de piekafvoeren;
- de relatie met de neerslag;
- de relatie met de overstort(en);
- de mogelijk optredende stroomsnelheden;
- het sedimenttransport;
- de kans en mate van sedimentatie en erosie;
- de relatie tussen de beekpeilen en de grondwaterstanden in de omgeving;
- de invloed van de beekpeilen en grondwaterstanden op de nabijgelegen natuurwaarden.

Uit de eerste veldverkenningen, veldmetingen en meetreeksen van 2019 is gebleken dat:

- relatief kleinschalige locatiespecifieke factoren, zoals autonoom of door mensen veroorzaakt transport van kleine en grote stukken hout lokaal grote invloed kunnen hebben;
- al bij lage debieten erosie optreedt en grind en stenen al snel worden getransporteerd.

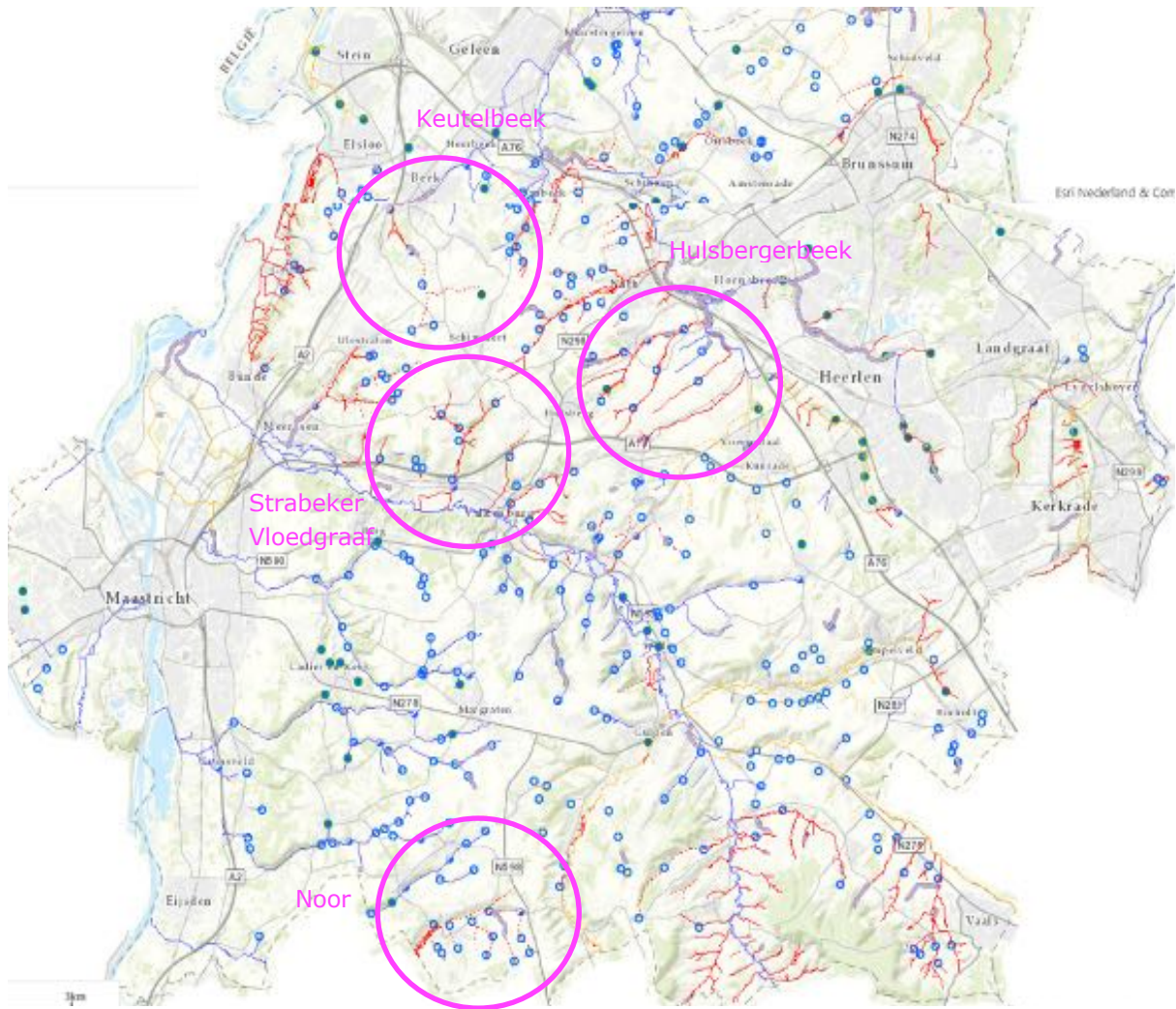
Voor de monitoring en vooral de metingen van de bodemligging en dwarsprofielen betekende dit dat de gewenste nauwkeurigheid van enkele centimeters niet realistisch was en dat het daardoor niet mogelijk was om vlakdekkende metingen te verkrijgen waarmee vergelijkingen door middel van rastercalculaties konden worden gedaan. Daarom zijn frequentere terreinverkenningen en handmetingen uitgevoerd. Hiermee is rekening gehouden met de monitoring volgens het BACI-principe door ook in het controletraject frequenter te monitoren. De waarde daarvan bleef echter beperkt door de zeer grote dynamiek en de beperkte nauwkeurigheid. Het is daardoor niet mogelijk om een controletraject te vinden dat identiek functioneert als het experimentele traject.

Stedelijk water / riolering

Bij de inventarisatie van de gegevens van de riolering zijn de ligging van de overstorten, het type stelsel en de rioleringsplannen bestudeerd. Voorafgaand aan en na de veldverkenningen zijn de ligging van de overstorten en lozingspunten ten opzichte van de beken met waargenomen diepe insnijdingen beschouwd en daarbij viel op dat veel overstorten relatief hoog op de terrasranden zijn gelegen en dat die situaties benedenstrooms grote invloed hadden. De meest extreme voorbeelden van sterk antropogeen beïnvloedde versnelde erosie en diepe insnijding waren direct in verband te brengen met de overstorten en te effecten ervan benedenstrooms waren eenvoudig te verklaren.

Verder lijken de frequenties en hoeveelheden van overstorten hoger te zijn dan op basis van de gegevens in lozingsvergunningen en het Gemeentelijk Riolerings Plan (GRP) zou kunnen worden verwacht. Vast staat dat de overstorten een hoofdrol spelen in de diepe insnijding en de erosie. Dit blijkt ook uit de onderstaande kaart.

Er lijkt een verband te zijn tussen de toename van de afvoerdynamiek en het recente afkoppelen van verharde oppervlakken. Tijdens de veldverkenningen is waargenomen dat op diverse plekken waar nieuwe wegen en riolering zijn aangelegd het water eerder sneller dan langzamer lijkt af te stromen. De gegevens om dit te verifiëren ontbraken. Nadere bestudering van de gegevens van het veranderde grondgebruik, de aanpassingen van wegen en riolering en de toename van het (afgekoppelde) verharde oppervlak kunnen meer duidelijkheid geven.



Figuur 2.10. Kwetsbaarheid voor overstorten (rood is kwetsbaar, buffers zijn blauw)

2.6 Selectie onderzoeksgebieden

De selectie van de geschikte gebieden voor onderzoek en experimenten is zorgvuldig en in nauwe samenwerking met het deskundigenteam verricht. Daarbij is gebruik gemaakt van de gegevens uit de veldverkenningen, quickscan en de stroomgebiedskenmerken die op dat moment beschikbaar waren, zoals uitgelegd in figuur 1.1. Ten behoeve van de selectie zijn uiteindelijk de volgende criteria gebruikt:

- onnatuurlijk diepe insnijding gesignaleerd of vermoed (met aanduiding van de locatie);
- diepe insnijding vormt een serieus probleem of risico voor de ecologie (m.n. grondwaterafhankelijke natuur);
- er is sprake van urgentie;
- aanwezige relevante natuurwaarden en habitattypen in het beekdal worden bedreigd
- bovenstrooms stedelijk gebied aanwezig;
- overstort(en) aanwezig;
- effectgerichte maatregelen zijn reeds (gedeeltelijk) uitgevoerd
- experimenten vormen geen risico voor aanwezige aquatische natuurwaarden
- meetgegevens van waterpeilen en debieten beschikbaar;
- hydrologische modellen beschikbaar;
- schaal waarop het effect optreedt;
- effecten van uitgevoerde experimenten en maatregelen zijn meetbaar.

De resultaten van de beoordeling van de onderzoeksgebieden zijn opgenomen in bijlage 2.

Op basis van deze criteria is gebleken dat de Strabeker Vloedgraaf in het Ravensbosch en de Keutelbeek in het Kelmonderbos de meest geschikte onderzoeksgebieden zijn. Bij de Noor vindt al aanvullend onderzoek plaats en de schaal van de maatregelen in de Hulsbergerbeek zijn te lang geleden en te grootschalig voor een goede reconstructie van de maatregelen en evaluatie. Tevens is door het deskundigenteam besloten dat er geen aanvullend onderzoek in de Noor plaatsvindt.

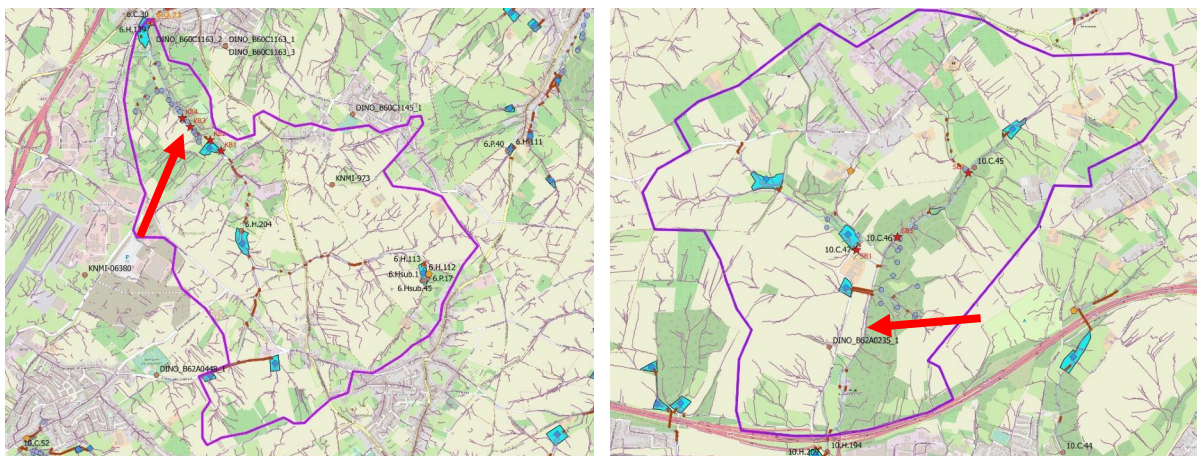
2.7 Selectie locaties en maatregelen

Vervolgens is in het overleg van het deskundigenteam Heuvellandbeken in juni 2019 een eerste selectie van de locaties en de experimentele maatregelen gemaakt die daarna uitvoerig met het waterschap zijn besproken. Door de beperkte opbrengst van de quickscan zijn de voorgestelde oplossingen vooral gebaseerd op eigen inzichten en de randvoorwaarden die aan de maatregelen werden gesteld door het waterschap Limburg.

Oplossingen en experimentele maatregelen moeten voldoen aan de volgende voorwaarden:

- geen blijvend negatief effect hebben op de aquatische ecologie en natuurwaarden;
- bestand zijn tegen hoge stroomsnelheden tijdens piekafvoeren;
- turbulentie mag niet toenemen, dus geleidelijke overgangen;
- onder- en achterloopsheid (stroming onder langs een object) moet duurzaam worden voorkomen;
- oppassen voor verweking en instabiliteit van de bedding.

Tijdens een gezamenlijk veldbezoek met het deskundigenteam op 30 oktober 2020 zijn in goed overleg de definitieve locaties voor de experimenten gekozen. Daarbij is bewust gekozen voor de trajecten waar de insnijding het grootst was, zodat het een worst-case betreft. Qua experimentele maatregelen is uiteindelijk gekozen voor grindsuppleties in zowel de Strabeker Vloedgraaf als de Keutelbeek om de effecten van het verschil in de bodemopbouw en de samenstelling van het beddingmateriaal te vergelijken. De locaties zijn weergegeven in figuur 2.11 en in bijlage 3.



Figuur 2.11. Locaties van experimenten in de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf (rechts)

2.8 Monitoring

Het grootste deel van dit onderzoek betrof in feite een continue monitoring, het vastleggen van de uitgangssituatie, het inmeten van de maatregelen, vervolgens het meten van de effecten daarvan en tenslotte het inmeten van de eindsituatie. Gedurende dit onderzoek zijn de werkwijze en de methoden steeds geëvalueerd en verfijnd op basis van de tussenresultaten.

In juli 2019 zijn tijdelijke meetpunten ingericht om ervaring op te bouwen en de nulsituatie vast te leggen in enkele beken met de grootste insnijdingen; de Noor bij Noorbeek, de Strabeker Vloedgraaf bij Valkenburg en de Keutelbeek bij Kelmond. Na de eerste ervaringen met de peilmetingen en eenvoudige experimentele monitoringmethoden is vanwege de beperkt bruikbare bestaande (meet)gegevens en modellen besloten de monitoringstrategie in eerste instantie primair te richten op het zo objectief mogelijk meten van de effecten van experimentele oplossingen en maatregelen. Later is dat uitgebreid en uiteindelijk is tot 16 juli 2021 intensief gemeten.

De basis van de BACI (Before After Control Impact) -monitoring bestond uit:

- continue peilmetingen met dataloggers met een interval van 15 minuten in 4 vaste meetpunten;
- debietmetingen met een Thomson meetschot met een interval van 15 minuten;
- hoogtemetingen van de beddingbodem met een Total Station voor, tijdens en na de experimenten;
- frequente visuele waarnemingen vastgelegd in fotorapportages;
- frequente metingen van de erosiebouten, op basis van de neerslag(verwachtingen);
- handmatige metingen in raaien waarin vaste meetpunten zijn aangebracht.

De locaties van de monitoringtrajecten en de meetpunten zijn weergegeven in bijlage 3.

Op basis van de resultaten en daaruitvolgende nieuwe vragen zijn gedurende het onderzoek in de Strabeker Vloedgraaf nog enkele meetpunten toegevoegd o.a. om de grootste bronnen van het water in de beek te meten. Dit betrof de Berkenhofbeek, de Vloedgraaf op de Voorste Brummenkuil (overstort met buffer) en de Kleinhaasdalervloedgraaf (overstort zonder buffer).

Vanwege onzekerheden en discussies over de resultaten door het beperkte aantal piekafvoeren om de maatregelen goed te evalueren is de monitoring hervat en geïntensiveerd op 13 juli 2021, op basis van de weersverwachtingen. Hierdoor zijn gedurende de periode van 13 tot 16 juli 2021, dus gedurende de periode met extreme buien, waterpeilen gemeten met een interval van 5 min in het experimentele traject en de belangrijkste bronnen; de Kleinhaasdalervloedgraaf, de Vloedgraaf op de voorste Brummenkuil en de zijtak van de Berkenhofbeek bij de Carexweide.

Erosiemetingen

De erosie in de bedding is zeer dynamisch en er is grote ruimtelijke en temporele variatie. Dit is ook sterk afhankelijk van de actuele omstandigheden op de meetlocatie. Een passerend stuk hout of een spontaan gevormde takken- en bladdam kan lokaal al tijdelijk effect hebben. Hierdoor is het lastig om trends te herkennen en relaties met de peil- en afvoerdynamiek te onderzoeken. Het is daardoor ook niet mogelijk om gedetailleerd vlakdekkend trajecten in te meten en deze daarna door rastercalculaties met elkaar te vergelijken. Dit nadeel is ondervangen door een combinatie van meerdere monitoringmethoden.

Voor het onderzoek naar de veranderingen in de beddinggeometrie zijn meerdere gedetailleerde opnamen uitgevoerd met combinaties van een Total Station, GPS-metingen en handmetingen in dwarsprofielen. Tegelijkertijd zijn metingen aan de (meer dan 50) erosiebouten verricht die ook in NAP zijn ingemeten zodat de diverse datasets met elkaar kunnen worden vergeleken.

Met zeer hoge nauwkeurigheid (< 1 cm) is met een Total Station meetinstrument ingemeten:

- de uitgangssituatie van de bodemligging coördinaten in RD en de hoogte tov NAP;
- de meetpunten met dataloggers en erosiebouten;
- vaste meetpunten van raaien aanleggen bij de meetpunten met dataloggers;
- de aangebrachte maatregelen tbv de experimenten;
- de eindsituatie bij de afsluiting van de monitoring.

Met minder grote nauwkeurigheid (2 à 3 cm) zijn relevante visuele waarnemingen ingemeten mbv afstandsmeters, GPS en met handmetingen en verklidders:

- de bodemligging in de raaien;
- kartering van substraat (bodemsamenstelling);
- veranderingen in het substraat (bodemsamenstelling);
- kartering van bijzondere objecten, zoals stenen, stukken hout en takken.

Gedurende het gehele onderzoek zijn visuele veldwaarnemingen gedaan en fotorapportages gemaakt. Doordat al in een vroeg stadium duidelijk werd dat er ook significante veranderingen in de bodem optraden bij geringe afvoeren is de frequentie van de visuele waarnemingen en de metingen van de erosiebouten verhoogd.

Neerslag

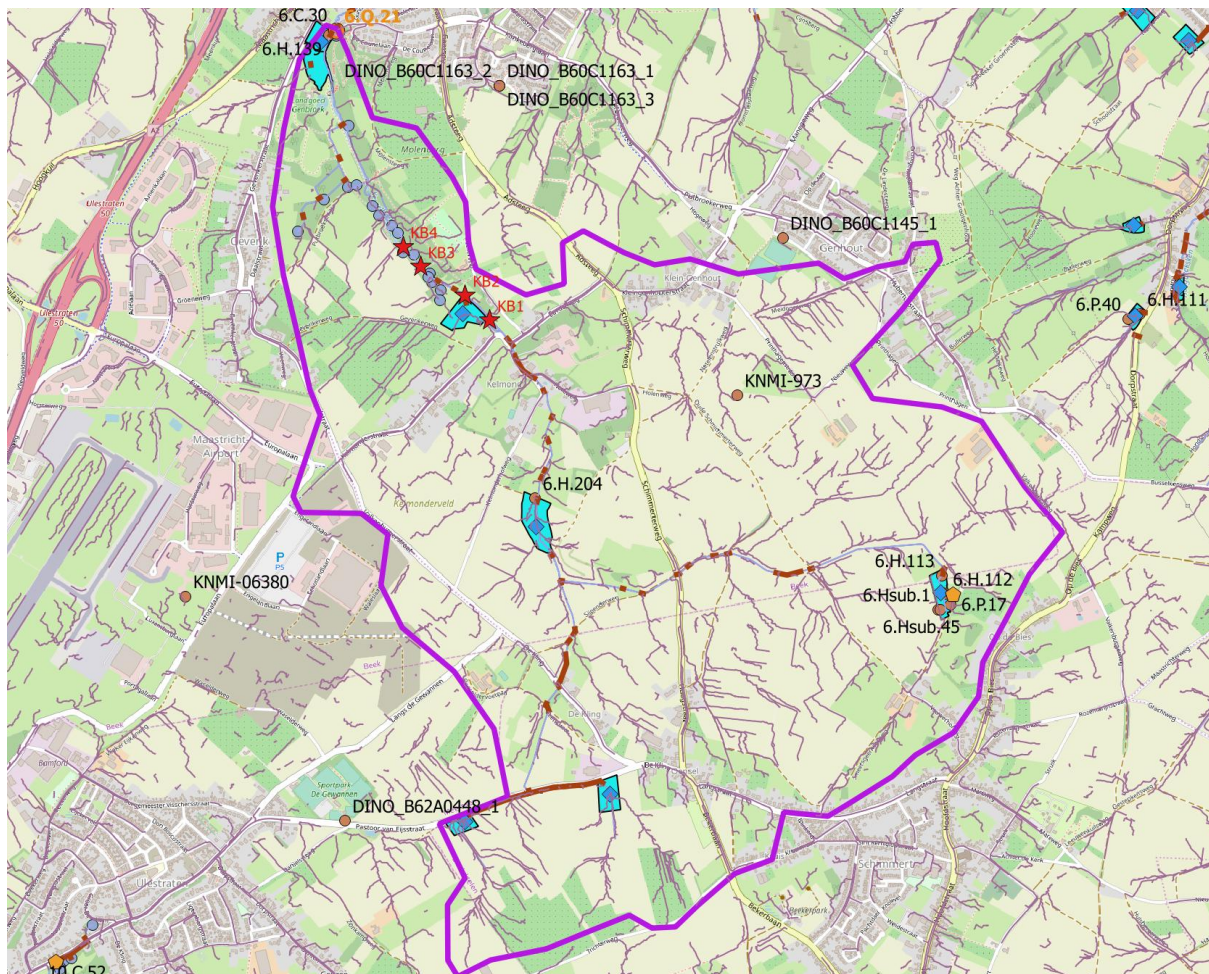
De neerslag kan in het heuvellandschap van Zuid-Limburg vooral bij extreme buien lokaal zeer sterk verschillen. Daarom is voor de bepaling van de neerslag in de stroomgebieden van de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf gebruik gemaakt van meerdere bronnen. Dit betreft de meetgegevens van de meetstations van het KNMI uursommen van Maastricht 380, de dagsommen van de neerslagstations Valkenburg, Beek en Ubachsberg en MeteoBase. Daarnaast is gebruik gemaakt van eigen visuele waarnemingen, Buienradar en waarnemingen, films, foto's en metingen van de familie Lemmens in Klein Haasdal.

3. Resultaten watersysteemanalyses

3.1 Keutelbeek in Kelmonderbos

Stroomgebied

De stroomgebieden van de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf (en de Watervalderbeek en de Platsbeek) hebben hun waterscheiding op het Plateau van Schimmert. Doordat dit stedelijk gebied van Schimmert betreft en deel uitmaakt van een rioleringsgebied en niet exact duidelijk is hoe het rioleringsstelsel functioneert kunnen de precieze waterscheidingen niet worden aangegeven. Deze zijn waarschijnlijk in de praktijk ook afhankelijk van de betreffende bui en de situatie in het rioolstelsel. Meer informatie is opgenomen in bijlagen 4 en 5.



Figuur 3.1. Stroomgebied Keutelbeek met buffers (blauw) en meetpunten (rode ster)

Geo(morfo)logie

Het grootste deel van het onderzoeksgebied bestaat uit een licht golvend plateaugebied. Aan de zuidzijde loopt het terrein steil af naar de Geul; aan de noord- en oostzijde is de helling naar het dal van de Geleenbeek aanzienlijk minder steil. Het plateau watert naar alle richtingen af.

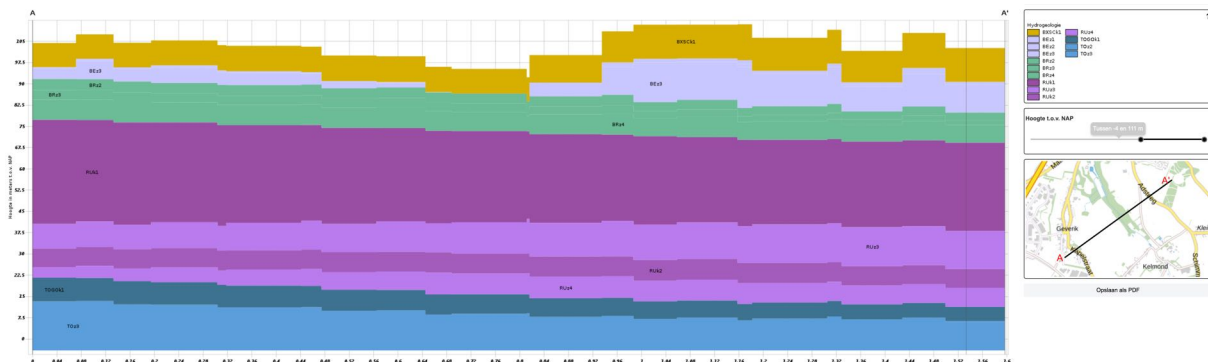
De geomorfologische BRO-kaart van 2019 geeft voor de beekdalbodem van de Keutelbeek in het Kelmonderbos de landvormeenheid LR42 op met een steilste verhang van 1° en een maximaal hoogteverschil binnen de vorm van 0.25 tot 0.5 m. Dit komt niet overeen met de geconstateerde diepe insnijding van meer dan 2 meter. De afbraakwand ten oosten van de beek wordt beter beschreven met een reliëf met steile zeer korte hellingen > 8° en een lokaal maximaal hoogteverschil van 12.5 tot 30 m. Ook de beschrijving van de lösswanden ten westen van de beek met een reliëf met flauwe korte hellingen 1° tot 8° en een lokaal maximaal hoogteverschil 12.5 tot 30 m komen overeen met de werkelijkheid.

Bodemopbouw

De Keutelbeek heeft een vrij uniforme geologische bodemopbouw met een dikke deklaag van de Formatie van Boxtel (löss), daaronder de Formatie van Beegden (grover zand), die in het beekdal dun is en daaronder de Formatie van Breda (afwisselend zand en kleilagen).

Het grootste deel van het gebied heeft een lössbodem. Op de vlakke delen van het plateau en op flauwe hellingen bevinden zich daalbrik- en radebrikgronden, waarin één inspoelingshorizont (de briklaag) is ontwikkeld. Ook op steilere hellingen die nooit in cultuur zijn gebracht worden radebrikgronden aangetroffen. Elders is op die steilere hellingen meestal een deel van de bovengrond door erosie afgespoeld. In bergbrikgronden kwam de briklaag hierdoor aan de oppervlakte te liggen. Vooral op steile hellingen is ook de briklaag soms verdwenen en ligt het moedermateriaal aan de oppervlakte. De bodemkaart spreekt hier van ooivaaggronden. Het erosiemateriaal, verspoelde löss, kwam terecht in de dalen. In de loop van de tijd werden de dalen gedeeltelijk opgevuld door dit zogenaamde colluvium. Ook deze gebieden zijn tot de vaaggronden gerekend.

Uit nabijgelegen boringen blijkt dat de bodem bij het onderzoekstraject bestaat uit dikke leemlaag van circa 6 à 7 m op grind (DINO-loket B60C2430 en B60C2431).



Figuur 3.2. Verticale doorsnede van het beekdal van de Keutelbeek (DINO-loket, REGIS II v2.2)

Watersysteem

De Keutelbeek is een zijbeek van de Geleenbeek die in Kelmond ontspringt. De beek loopt door de kern van Beek, vervolgens door Neerbeek, Spaans Neerbeek, Krawinkel en Oud-Geleen. In Beek was de beek tot 2018 vrijwel geheel overkluisd maar sindsdien weer als beek terug in het zicht gebracht. Het overkluisde deel maakte onderdeel uit van de gemeentelijke riolen van de Beek en Geleen. In onderstaande tabel zijn enkele gegevens opgenomen. Het gemiddelde verhang in het onderzoekstraject bedraagt 5.3 m/km.

Stroomgebied tot. opp.	2.131	(ha)
Lengte (km)	7.657	(km)
Verhang	5.60	(m/km)
Verhang in onderzoekstraject	5.30	(m/km)
Normaal debiet	0.018	(m ³ /s)
Maximaal debiet	> 0,14	(m ³ /s)

Tabel 1.1.: Kentallen van de Keutelbeek

Het stroomgebied van de Keutelbeek bovenstrooms het onderzoekstraject bestaat uit een stelsel van vloedgraven die benedenstrooms Kelmond in het bosrijke beekdal in de heuvellandbeek uitmonden. Opvallend is dat pas precies bij het begin van het bos permanent stromend water aanwezig is, waarschijnlijk omdat daar enkele bronnen ontspringen. Er bevinden zich in totaal 5 regenwaterbuffers waarvan 4 bovenstrooms Kelmond: Op de Bies met een overstort in de Siepen- en Gijsbergervloedgraaf (1984), Heufkensveld (2014), Ulerveld (2013), de grote buffer Gijsenberg (2014) en net benedenstrooms het dorp en bovenstrooms het bos de meest recente buffer Kelmond (2018). Verder benedenstrooms ligt nog de buffer Genbroek waar ook een peil- en debietmeetpunt (6Q21) is gelegen. De buffers spelen een grote rol in het functioneren van de Keutelbeek. Samen kunnen ze een grote hoeveelheid water bergen en de afvoer reduceren. Desondanks zijn al bij de eerste peilmetingen tijdens de piekafvoer op 20 juli 2019 benedenstrooms de buffers forse peilstijgingen gemeten.

Overigens ontvangt de buffer Siepen- en Gijsbergervloedgraaf regelmatig overstorten uit het gemengde rioolstelsel van Schimmert. Doordat het water via de vloedgraaf naar de grote buffer Gijsenberg stroomt alvorens verder te stromen zal de invloed benedenstrooms niet zo groot zijn.

In het stroomgebied van de Keutelbeek worden de waterstanden al continu gemeten door het waterschap Limburg ter plaatse van:

- de buffer in de Siepen- en Gijsenbergervloedgraaf, 6H112 en 6H113 (vm buffer Schimmert, 6Hsub1 en 6Hsub45);
- de buffer Gijsenberg 6H204;
- de buffer Genbroek 6H139 en 6H48;
- Keutelbeek in Beek 6H186.

Deze metingen vinden echter alleen plaats in de buffers en niet in de beek. Hierdoor geven ze in feite dus slechts informatie over de vulling van de buffers. Voor ons onderzoek zijn deze dus niet geschikt. Verder is er ook een debietmeetpunt met meetgoot (6.Q21) bij de monding van de buffer Genbroek, maar ook die meet slechts het debiet dat uit de buffer stroomt, hetgeen maar een deel is van het totale debiet en gebufferd. Verder zijn mogelijk benedenstrooms in de kern nog enkele meetpunten geweest in het kader van de ontkeuizing van de beek, maar de gegevens daarvan waren gedurende het onderzoek niet beschikbaar.

Omdat bleek dat de bestaande meetgegevens, door de ligging van de meetpunten, nog niet voldoende inzicht gaven in de afvoerdynamiek van het geselecteerde onderzoekstraject zijn op 20 juli 2019 tijdens de veldverkenning dataloggers geplaatst op de volgende 4 locaties:

- KB1; benedenstrooms de 1^e kleine buffer in de Siepen- en Gijsenbergervloedgraaf, onder duiker D50;
- KB2 benedenstrooms de 2^e grote buffer (Kelmond) in de Siepen- en Gijsenbergervloedgraaf, in sliblaag duiker D80;
- KB3: benedenstrooms onder de 2e brug in de Keutelbeek;
- KB4: bij de diepe insnijding, bovenstrooms opstuwung dood hout.

Bij meetpunt KB4 is ook een matje geplaatst om te kijken welke materialen kunnen worden getransporteerd.



KB6 insnijding



Weinig divers substraat, vooral slib



KB4 in traject benedenstrooms ligt dood hout



KB4 boven stroomversnelling en matje

De meetresultaten zijn weergegeven in figuur 3.3. Daarin vallen de volgende zaken op:

- op 20 juli 2019 is sprake van een reeds dalende afvoerpiek van ca 42 cm bij KB1 en KB2 tijdens de plaatsing van de dataloggers;
- op 27 en 28 juli 2019 zijn er 3 opeenvolgende pieken bij alle meetpunten (ca 28 cm KB2);
- een kleinere piek op 2 augustus 2019 bij KB1 en KB2;
- verder benedenstrooms bij KB3 en KB4 zijn de peilstijgingen minder groot als gevolg van vertraging en afvlakking van de afvoergolf;
- de debietmeting bij 6Q21 benedenstrooms buffer Genbroek heeft een vergelijkbaar verloop met dezelfde opvallende 3 opeenvolgende pieken;
- uit de ongevalideerde meetreeks van het waterpeil in de buffer Genbroek blijkt dat daar alleen een peilstijging is gemeten op 31 juli 2019, aanbevolen wordt deze meetreeks nog nader te bestuderen.



Figuur 3.3. Gemeten waterstanden (drukhoogten in cm waterkolom) en debiet in meetpunt 6Q21

Tijdens de veldverkenning en plaatsing van de dataloggers op 20 juli 2019 is waargenomen (weergegeven op onderstaande foto's) dat:

- de waterstanden kort voor de veldverkenning hoger waren en al aan het zakken waren;
- er geen water via de bovenstroomse drempel in de grote buffer is gestroomd;
- de grote buffer zich vulde via de uitlaatopening benedenstrooms;
- de afvoer in de Siepen- en Gijsbergervloedgraaf en de Keutelbeek ondanks de buffers nog groot was en tot hoge stroomsnelheden en turbulentie leidt.

De gemeten pieken komen goed overeen met de neerslaghoeveelheden die gemeten zijn door station 380 van het KNMI bij Maastricht airport (24 mm in 4 uur/ max 13 mm/uur).



Figuur 3.4. meetpunten dataloggers Keutelbeek en buffers Kelmond

Dat de grote buffer werd gevuld via de uitlaatopening benedenstrooms en niet via de drempel die bovenstrooms is aangelegd duidt erop dat de grote buffer nog niet optimaal functioneerde en niet effectief werd benut bij buien met een vergelijkbare neerslaghoeveelheid en -intensiteit (24 mm in 4 uur). Dat de buffer Genbroek benedenstrooms pas op 31 juli 2019 zou zijn volgelopen is merkwaardig. Dit valt wel samen met de korte piek in de debietmeting benedenstrooms de buffer op die dag. Mogelijk heeft dit ook te maken met de bediening van de spindels.



Grote buffer benedenstroomse vulling 17:29



Benedenstroomse vulling 18:38 (zie ook film)



Drempel bovenstrooms grote buffer 17:21



Gedaalde waterstand drempel 18:42

De Keutelbeek heeft door diepe insnijding ook steile oevers die veelal bestaan uit leem en löss maar het bodemmateriaal is niet zo vast en compact, waarschijnlijk door een gering lutumgehalte en een groter gehalte aan zand. De toplaag van de beddingbodem is vrij homogeen en bestaat vooral uit slap deels organisch sediment, met alleen heel lokaal wat grind. Direct na piekafvoeren zijn vaak houtophopingen en slibhopen aanwezig. Het ontbreekt hier aan voldoende gevarieerd substraat. De meeste harde substraten zijn resten van tegels en stenen, grind komt weinig voor. De slappe toplaag van de beddingbodem werd bij alle veldverkenningen waargenomen en bij de meetpunten was steeds sprake van sedimentatie. Alleen tijdens piekafvoeren wordt de slappe laag ten dele wegspoeld.

Gedurende de monitoringperiode is het waterschap bezig geweest met empirische aanpassingen van de sturing van de spindels voor de vulling en leging van de buffers. Hierdoor is de afvoer in het onderzoekstraject zodanig beïnvloed dat het systeemgedrag van het bovenliggende watersysteem niet meer goed kon worden onderzocht. In feite is de monitoring dan meer een evaluatie van het functioneren van de buffer Kelmond. Het geeft wel nog altijd een indruk van de effecten van de effectgerichte maatregel van de optimalisatie van buffering en meer geleidelijke leging. De analyse nadere van de meetreeks is zeer nuttig, maar viel helaas buiten de scope van dit onderzoek. Om deze reden en vanwege de waargenomen en gemeten gematigde afvoerdynamiek en de geringe erosie in het experimentele traject was het niet nodig en niet zinvol om de monitoring verder te intensiveren.

Er is voldoende lang gemeten om de conclusies te trekken en ook om de effectiviteit van de buffers te bepalen. Daarvoor zijn dan wel de aanpassingen van de drempels en de bediening van de spindels benodigd. Uit de monitoring blijkt wat er is gebeurd tijdens de piekafvoeren en hoe het

systeem met de buffers werkt. Maar dat is helaas nog niet zo positief, want hoewel het debiet bij piekafvoeren is gereduceerd levert de lozing waarschijnlijk nog steeds te veel hydraulische stress (en langer). Bovendien domineert daardoor de sedimentatie wat resulteert in een laag fijn slib die alleen bij perioden met grotere afvoeren tijdelijk afwezig is. Dit werd niet waargenomen bij de vele veldverkenningen.

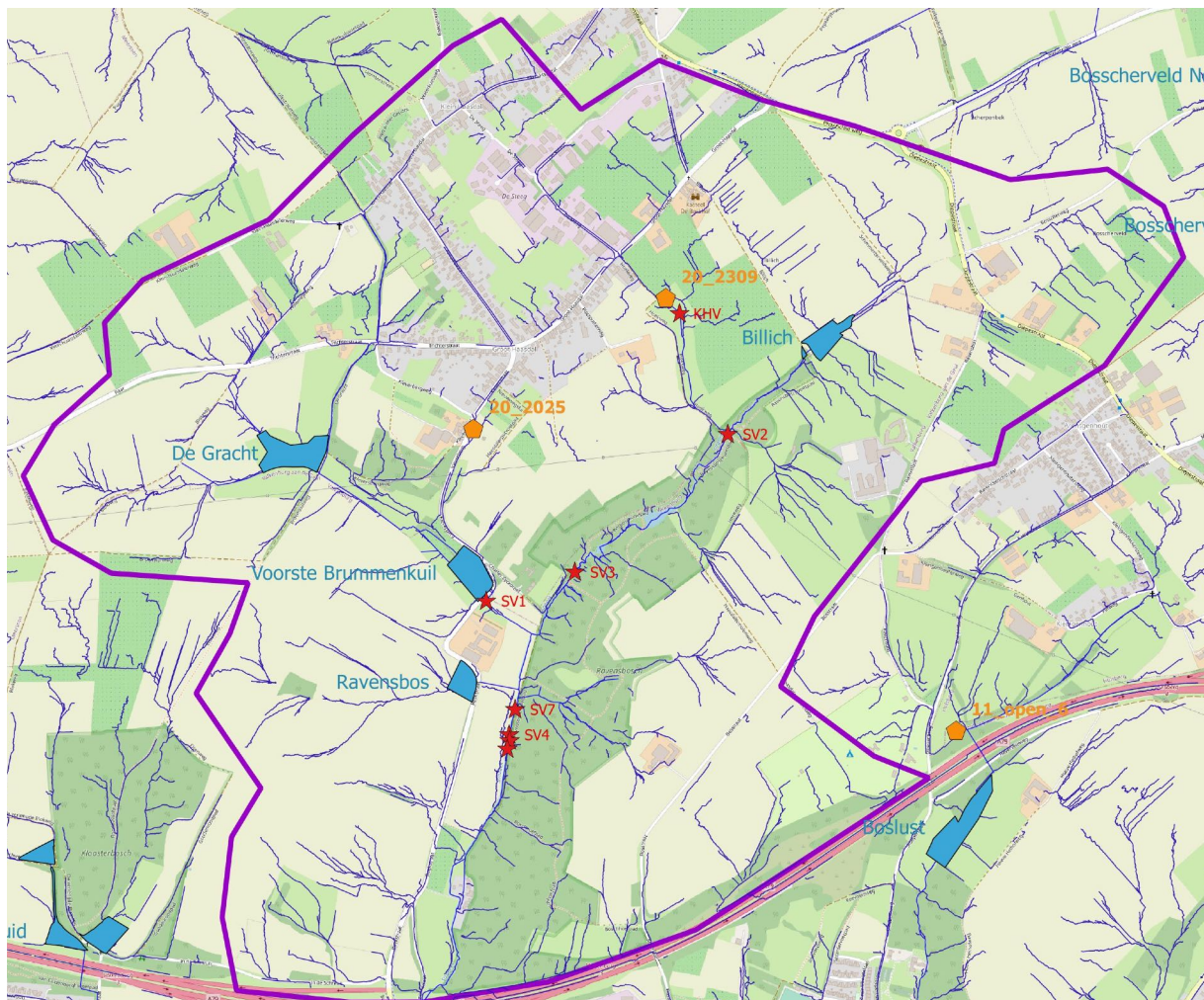
Grondwater

Bij peilbuis B60C2304, bovenstrooms meetpunt KB1, waar het maaiveld ligt op 98.67 m+NAP was een grondwaterstand tussen 94.5 en 97.5 m+NAP (4.17 à 1.17 m-mv) in de periode van 1953 tot 2001. In de laatste 20 jaar betrof de stijghoogte maximaal 96 m+NAP (2.67 m-mv) en duidelijk beneden de bodem van de vloedgraaf. Ook bij peilbuizen B60C1163 en B60C2293 op enige afstand van de beek zijn lage stijghoogten gemeten. Schijnbaar heeft de Keutelbeek niet een zo duidelijk drainerende werking op de directe omgeving van de beek. Mogelijk worden de bronnen in het Kelmonderbos niet gevoed door grondwater uit de nabijgelegen löss- en afbraakwanden, maar uit dieper lagen en uit het hoger gelegen plateau. De bronnen zijn het gehele jaar watervoerend en worden weinig of niet beïnvloed door neerslag.

3.2 Strabeker Vloedgraaf in Ravensbosch

Stroomgebied

Het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf is gelegen op de zuidelijke helling van het Plateau van Schimmert en is min of meer trechtervormig.



Figuur 3.5. Stroomgebied Strabeker Vloedgraaf met buffers (oranje) en meetpunten (rode ster)

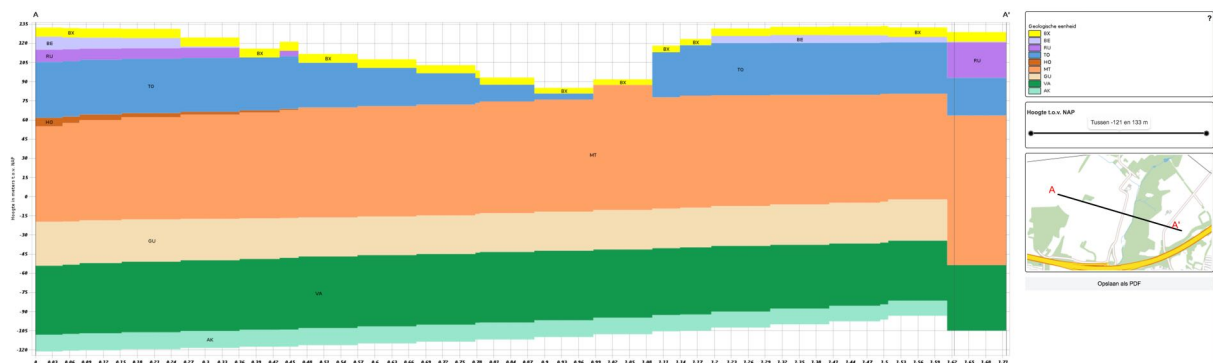
De Strabeker Vloedgraaf wordt gekenmerkt door een vertakt systeem met twee grote takken, namelijk de Vloedgraaf op de Voorste Brummenkuil in het westen en de Kleinhaasdaler Vloedgraaf en de tak van Billich in het noordoosten.

Een groot deel van Schimmert en geheel Groot- en Klein Haasdal zijn in het stroomgebied gelegen op het plateau. Dit stedelijk gebied maakt deel uit van een rioleringsgebied met twee overstorten op de Strabeker Vloedgraaf. Dit rioleringsgebied leidt tot een onduidelijk te definiëren stroomgebiedsgrens.

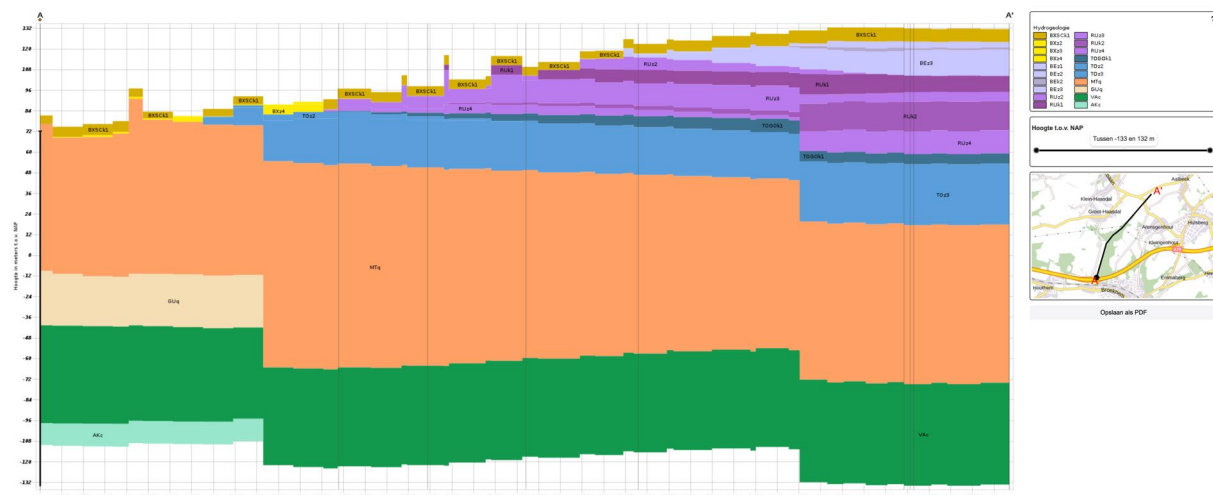
Geo(morfo)logie

De geomorfologische BRO-kaart van 2019 geeft voor de Kleihaasdalervloedgraaf de landvorm-eenheid droogdal R21 met matig diep dal met een steilste verhang van 1° tot 8° op. Hetzelfde geldt voor het dal bij de buffer Billich. Voor het gedeelte van de Strabeker Vloedgraaf benedenstrooms de Kleinhaasdalervloedgraaf wordt de landvormeenheid afbraakwand A41 gegeven met een reliëf met steile matig korte hellingen > 8° en een lokaal maximaal hoogteverschil van 60 tot 115 m. Het dal van de Berkenhofbeek ligt binnen deze eenheid en is beschreven als een droogdal R21 met matig diepe dalen (5 tot 30 m) met een steilste verhang van 1° tot 8°. De beekdalbodembodem van de Strabeker Vloedgraaf in het Ravensbos is eveneens gekarteerd als een droogdal R21 met zeer diepe dalen (≥ 30 m) en een steilste verhang van 1° tot 8°.

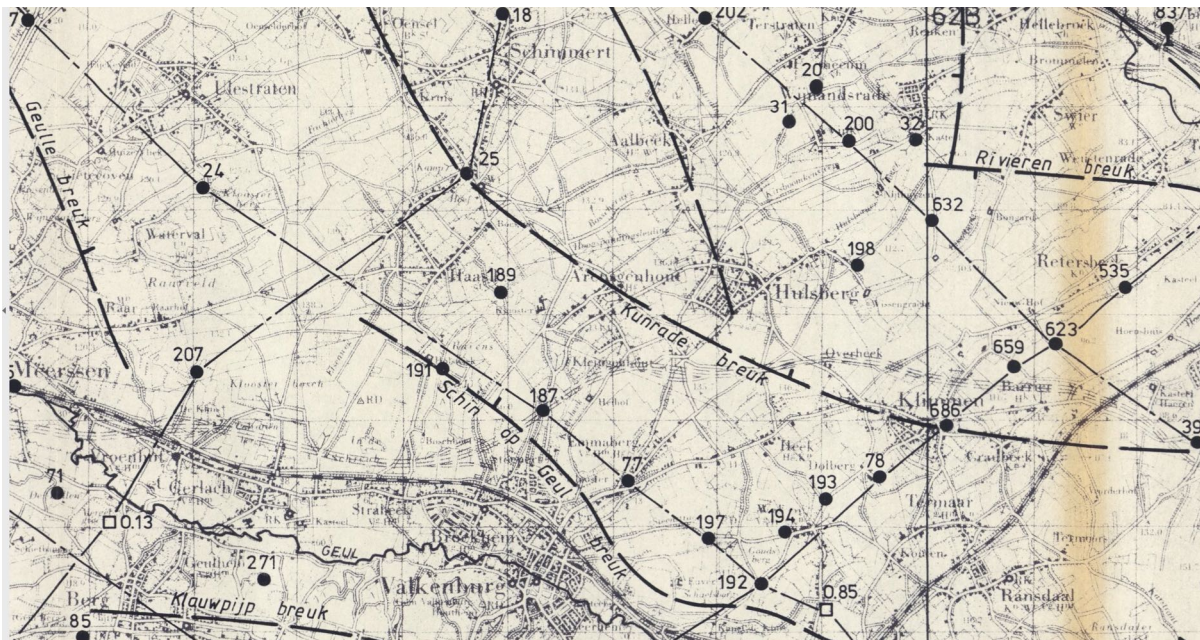
De lösslaag die vrijwel het gehele stroomgebied bedekt bestaat uit afzettingen van de Formatie van Boxtel, Laagpakket van Schimmert, een kleiige eenheid hoofdzakelijk bestaande uit leem met een spoor klei en zand. Ter plaatse van de onderzoekslocatie is strekt deze laag zich uit tot een diepte van circa 4 m-mv. De beekbedding is vrijwel geheel gelegen in deze laag. Onder de lösslaag komen op veel plekken pleistocene terrasafzettingen van de Maas voor van de Formatie van Beegden. Deze terrasafzettingen bestaan overwegend uit grof zand en grind. Deze bevinden zich dicht aan het oppervlak in het dal van de Berkenhofbeek en zijn waarschijnlijk voor grindwinning gebruikt. Dit blijkt ook uit de hoogtegegevens van het AHN2. In de Formatie van Beegden komen lokaal ook (humeuze) klei- en veenlagen voor zoals mogelijk in de Carexweide waar zich ook een kleilaag van de Formatie van Rupel dicht onder het maaiveld bevindt. Dieper worden klei- en zandafzettingen van de Formatie van Tongeren en de kalksteen van de Formatie van Maastricht aangetroffen.



Figuur 3.6. Verticale doorsnede van het beekdal met breuklijnen (DINO-loket, REGIS II v2.2)



Figuur 3.7. Verticale doorsnede van het beekdal met breuklijnen (DINO-loket, REGIS II v2.2)



Figuur 3.8. Fragment van de Grondwaterkaart met breuklijnen (TNO/DGV)

In het bovenstaande fragment van de Grondwaterkaart en de verticale doorsnede van de ondergrond is zichtbaar dat het stroomgebied wordt doorsneden door de Kunradebreuk bij Schimmert en de Schin op Geul breuk ter hoogte van de Voorste Brummenkuil. Het is niet duidelijk welke invloed deze breuken hebben op de hydrologie en grondwaterstroming. Door de dikke deklaag van löss in het beekdal zal dit waarschijnlijk niet veel invloed hebben gehad op de beek en het freatische grondwater in de deklaag.

Bodemopbouw

Het grootste deel van het gebied heeft een lössbodem. Op de vlakke delen van het plateau en op flauwe hellingen bevinden zich daalbrik-, radebrikgronden en ooivaaggronden. In de beekdalbodem is vooral erosiemateriaal en verspoelde löss aanwezig. De oostzijde van het beekdal betreft bos, de westzijde betreft akkerbouw, voornamelijk aardappelteelt.

Uit nabijgelegen boringen blijkt dat de bodem bij het onderzoekstraject bestaat uit dikke leemlaag van circa 4 m met daaronder zand (DINO-loket *REGIS II* v2.2).

Watersysteem

De Strabeker Vloedgraaf is een zijbeek van de Geul en een heuvellandbeek met een groot verhang in een vrij smal dal in het Ravensbosch, met steile flanken en twee vloedgraven. In de bovenloop bevinden zich 2 gestuwde (vis)vijvers en er zijn 4 regenwaterbuffers: Billich (2006), De Gracht (2013), Voorste Brummenkuil (1994) en meer benedenstrooms Ravensbos (2014).

De beek wordt pas permanent stromend bovenstrooms de bovenste vijver in het beekdal waar diverse bronnen zijn waargenomen. Door de aanwezigheid van de bronnen is de loop gevarieerd en zijn er diverse minder opvallende vertakkingen. Overigens staan niet al deze bronnen in de GIS-kaarten van het waterschap.

Het verhang van de Strabeker Vloedgraaf bedraagt gemiddeld 24 m/km en in het experimentele traject 17 m/km. De insnijding is op meerdere trajecten zichtbaar maar het meest prominent in de benedenloop in het onderzoekstraject.

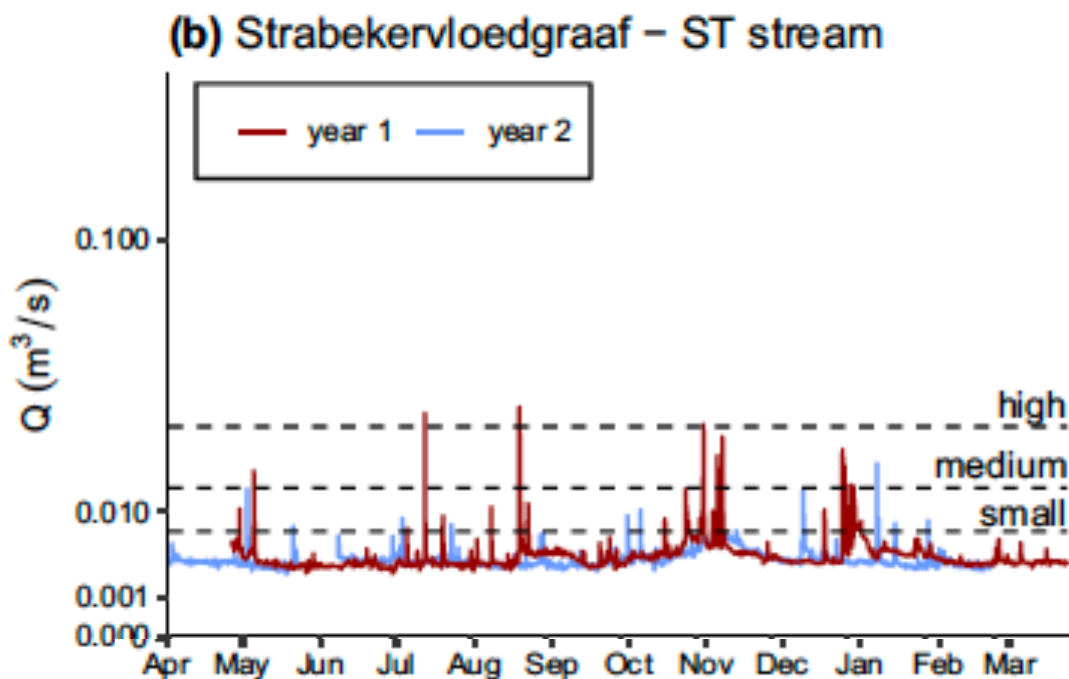
Doordat de beekdalbodem grotendeels bestaat uit colluvium waar de beek in ligt is de bedding van de beek zowel qua dwarsprofiel als qua oever- en beddingmateriaal zeer gevarieerd. Fijn slap organische materiaal, leem en grind wisselen elkaar af en zijn er gevarieerde substraatmozaïeken. In het experimentele traject bestaan de steile oevers vooral uit gladgepolijste leem, maar is het materiaal op de beddingbodem zeer heterogeen, variërend van grote keien, vuursteen, leemkluiten tot grind, waarbij grind domineert. De configuratie en de samenstelling van de substraatmozaïeken veranderen continu en geven telkens een weerspiegeling van de actuele afvoeren, mede door het transport van grind, dood hout en blad. Meerdere keren is waargenomen dat kort na piekafvoeren de bodem over grote delen bestaat uit los recent afgezet sediment, uiteenlopend van grote keien en grindbanken tot sliedlagen. Er is zelden langdurig evenwicht en daardoor is het ook erg moeilijk een representatief monster van de bedding te nemen (figuur 3.9).



Figuur 3.9. Voorbeeld van de grote variatie in het beddingmateriaal en substraatmozaïeken

In de hoger gelegen delen van het dal van de Strabeker Vloedgraaf en het dal van de Berkenhofbeek zijn meerdere waarnemingen gedaan van stroming via ondergrondse gangen die verder benedenstrooms weer dagzomen. Dit is waarschijnlijk het gevolg van een van de ongunstige eigenschappen van löss, het lage lutumgehalte. Hierbij spelen holen van dieren waarschijnlijk ook een grote rol. Mede hierdoor is er veel sedimenttransport in de Berkenhofbeek. De benedenloop ligt daardoor al snel vol sediment, ook bij relatief beperkte afvoeren. Dit was zelfs zo sterk dat de eerste peilmetingen daar gestopt zijn omdat de logger steeds bedekt raakte onder het slib. Toch gaf de Berkenhofbeek bij alle forse buien maar een zeer beperkte afvoer.

Door het waterschap Limburg worden continu waterstanden gemeten benedenstrooms de A79 bij de meetpunten 10H194 en 10H209 in de benedenstrooms gelegen buffers. Daarnaast zijn in het verleden zijn door het waterschap op diverse locaties bovenstrooms incidentele debietmetingen verricht tijdens een meetcampagne, maar helaas zijn deze gegevens beschikbaar gekomen. In de periode van 2002 tot 2004 is er onderzoek uitgevoerd door onderzoekers van de WUR (Van der Lee, 2020). Daarbij zijn gedurende 2 jaar peilen gemeten waaruit debieten zijn afgeleid. Daaruit volgt dat toen een basisafvoer van circa 4 l/s is gemeten en een maximum van circa 25 l/s (figuur 3.10). Dit is opvallend laag vergeleken met de waargenomen afvoeren tijdens veldverkenningen.



Figuur 3.10. Gemeten debieten in de Strabeker Vloedgraaf in 2002-2004 (Van der Lee, 2020)

Meer recent, in 2016 en 2018 zijn er ook debietmetingen verricht in de Strabeker Vloedgraaf (De Mars, 2018) waarbij een basisafvoer in de Strabeker Vloedgraaf van 1.57 l/s respectievelijk 1.13 l/s is gemeten bij de parkeerplaats van Staatsbosbeheer en 0.78 l/s respectievelijk 0.23 l/s in de Berkenhofbeek. Deze waarden zijn laag vergeleken met de metingen uit 2002-2004 en laag ten opzichte van de debietmetingen in het benedenstrooms gelegen onderzoekstraject. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat er water wordt onttrokken door de vegetatie en infiltratie optreedt vanuit de beekbedding.

Het debiet in de beek wordt uiteraard sterk bepaald door de snelheid waarmee het water uit het stroomgebied en de afwateringseenheden naar de beek stroomt. Daarbij is de mate van infiltratie en de mate van oppervlakkige afstroming afhankelijk van de vochttoestand en de verzadiging van de bovenste laag van de bodem. De mate van begroeiing en type vegetatie is hierop van grote invloed. In sterk begroeide oppervlakken en met name de bossen is de infiltratie groter en vindt weinig oppervlakkige afstroming plaats. Door de steile hellingen en de geringe natuurlijke berging is de interactie en uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater tijdens buien niet zo groot. Dit komt vooral doordat het water dan zo snel oppervlakkig afstroomt dat het niet snel genoeg kan infiltreren waardoor ook de vochttoestand, verzadiging en grondwateraanvulling heel anders kunnen worden.

Natuurwaarden

In het Ravensbosch bevinden zich de habitattypen H9120 (beuken-eikenbossen met hulst) aan de oostzijde van het beekdal, H9160B (eiken-haagbeukenbossen) en in de laagten langs de beek. De voornaamste natuurwaarden zijn vooral aanwezig in de talrijke bronnen en de beek, dit betreft de habitattypen H91E0C (vochtige alluviale bossen), H7220 kalktufbronnen en H7230 kalkmoerassen die zeer gevoelig zijn voor eutrofiering en verdroging. In de bronnen zijn zeer hoge nitraatconcentraties gevonden.

Op een enkele plek, ten noorden van de Carexweide (Kalkmoeras) in het Ravensbosch, neemt het deels de standplaats in van een hellingveen/Kalkmoeras. Het totale areaal bedraagt 4 hectare.



Vijver bovenstrooms



Vijver benedenstrooms



Achterloopse drempel 21-7-2019



Droogval vijver 25-3-2021

Onduidelijk is of en welke natuurwaarden gerelateerd zijn aan de twee vijvers. Beide vijvers zijn voorzien van een stuw en een overlaat. De grotere vijver bovenstrooms is voorzien van een stuw met een brug en een stortebed van circa 15 meter. Aan de voet daarvan ligt een erosiekuil.

De benedenstroomse kleinere vijver lekt waardoor het waterpeil in de zomer zakt tot ruim beneden de v-vormige overlaat, circa 50 cm lager. In beide vijvers zijn in de zomer veel vissen gesignaleerd en ook is algenbloei en een drijfslag van olie waargenomen.



Algenbloei drempel 21-5-2021



Stuw en bodemval onderste vijver 29-1-2021

Stedelijk water en riolering

Een deel van Schimmert en geheel Groot- en Klein Haasdal zijn in het stroomgebied gelegen en voeren overtollig hemelwater af naar de Vloedgraaf op de Voorste Brummenkuil Strabeker en de Kleinhaasdalervloedgraaf. Dit verloopt zowel via directe afstroming over verharde oppervlakken en via de riooloverstorten.

De overstort op de Kleinhaasdalervloedgraaf voert het water af van het bedrijventerrein De Steeg dat recent is gemoderniseerd en uitgebreid en is voorzien van een gelijknamige gemeentelijke buffer. Onduidelijk is of deze optimaal functioneert, omdat deze niet volledig gevuld was bij de piekbuien van 17 juni 2020 en 14 juli 2021. Uit de waargenomen afstroming en erosie en uit de peilmetingen valt af te leiden dat de berging beperkt is. De overstort in Groot Haasdal die op de buffer in de Vloedgraaf op de Voorste Brummenkuil loost lijkt beter te worden gedempt. Uit de samenvatting van de beoordeling op de voorwaarden van de basisinspanning en de KRW blijkt dat de overstort op de Voorste Brummenkuil wel aan de basisinspanning voldoet maar niet aan de KRW. Onduidelijk is of de overstort op de Kleinhaasdalervloedgraaf voldoet, opvallend is dat deze niet is weergegeven op de kaart met de samenvatting van de beoordeling (bijlage 5, laatste figuur).

Grondwater

In het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf zijn slechts enkele peilbuizen aanwezig, met bovendien relatief diepe filters waardoor geen goed beeld kan worden gevormd van de hydrologie in de bovengrond.

Bij peilbuis B62A2945, bovenstrooms de grotere vijver, waar het maaiveld op 103.66 m+NAP ligt en de bodem tot 1.2 m-mv uit leem bestaat varieerde de stijghoogte circa 103.15 m+NAP tot 102.15 m-mv in de zomers.

De peilbuis B62A0191, bij de slagboom in het Pieterpad, bovenstrooms het onderzoekstraject heeft een filter tussen 59.7 m+NAP en 58.7 m+NAP, hetgeen te diep is om een relatie te leggen met de hydrologie van de toplaag en de waterstanden in de beek. Het maaiveld ligt daar op 87.97 m+NAP en de bodem bestaat uit een grindlaag tot 1.0 m-mv op leem tot 3.5 m-mv. In de periode van 1971 tot 2001 varieerden de stijghoogten tussen 68 m+NAP en 66 m+NAP zonder duidelijke trends of (seizoens)variaties.

De peilbuis B62A0236, circa 400 m benedenstrooms het onderzoekstraject heeft een filter tussen 47.87 m+NAP en 42.87 m+NAP, hetgeen te diep is om een relatie te leggen met de hydrologie van de toplaag en de waterstanden in de beek. Het maaiveld ligt daar op 78.87 m+NAP en de bodem bestaat uit een leemlaag tot 2.8 m-mv op kalksteen. In de periode van 1977 tot 2012 varieerden de stijghoogten tussen 64.65 m+NAP en 63.25 m+NAP met grote golfbewegingen die niet kunnen worden verklaard door seizoenvariaties en zonder duidelijke trends.

4. Resultaten monitoring

4.1 Neerslag

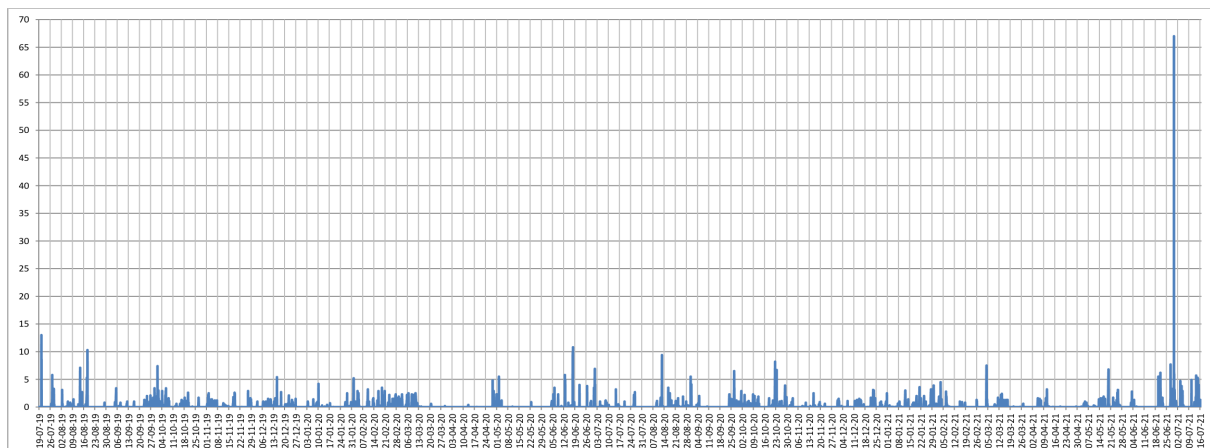
Voor de neerslag zijn de gegevens van de meetstations van het KNMI, de uursommen van Maastricht 380 en de dagsommen van de neerslagstations Valkenburg, Beek en Ubachsberg gebruikt. Daarnaast is gebruik gemaakt van eigen visuele waarnemingen, Meteobase, Buienradar en metingen van de familie Lemmens in Klein Haasdal, bij de overstort bovenstrooms in de Kleinhaasdalervloedgraaf.

Uit de beschikbare gegevens blijkt dat er diverse perioden zijn geweest met interessante en voor de analyse bruikbare neerslaggebeurtenissen. Er traden piekafvoeren op:

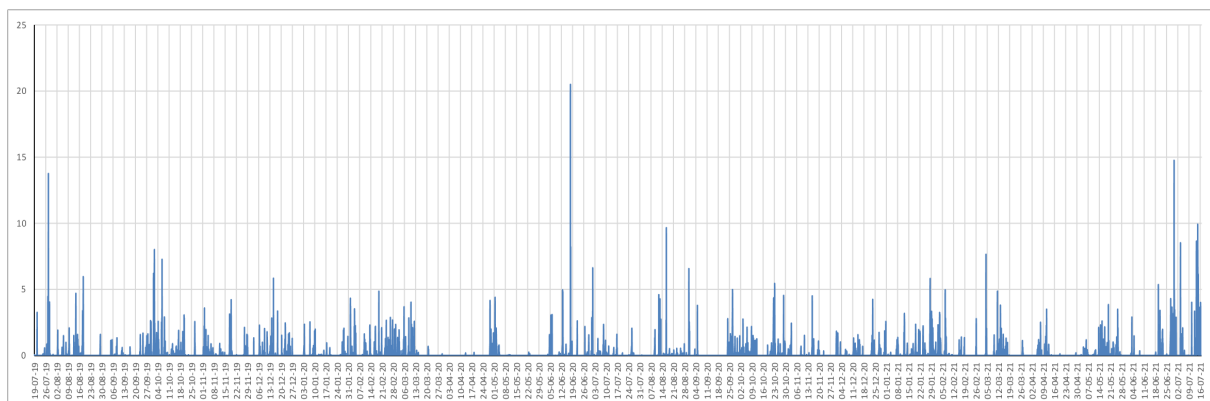
- 20 juli 2019, voor de Keutelbeek;
- 17 juni 2020, voor de Strabeker Vloedgraaf;
- 17 augustus 2020;
- 29 juni 2021, voor de Keutelbeek;
- 29 januari 2021, voor de Strabeker Vloedgraaf;
- 13 en 14 juli 2021, voor de Strabeker Vloedgraaf.

Daarnaast zijn er ook langere perioden geweest zonder neerslag tussen:

- 25 maart tot 28 april 2020;
- 8 mei tot 3 juni 2020;
- 9 tot 22 september 2020;
- 18 april tot 2 mei 2021.



Figuur 4.1. Extreme bui op 29 juni 2021, KNMI-station Maastricht 380, in stroomgebied Keutelbeek



Figuur 4.2. Neerslag Meteobase in stroomgebied Strabeker Vloedgraaf

Uit de onderlinge vergelijking van de metingen blijkt dat de verschillen lokaal heel groot zijn geweest, vooral bij extreme situaties. Dat maakt lokale waarnemingen extra nuttig.

De eerste serieuze extreme bui vond plaats op 17 juni 2020 en het is gelukt daarbij aanwezig te zijn zodat de effecten daarvan in het veld konden worden waargenomen totdat het te donker werd na 21:30 uur. Volgens Meteobase is er maximaal 20 mm in 1 uur en 37 mm in 8 uur gevallen (statistisch circa $T=2$).

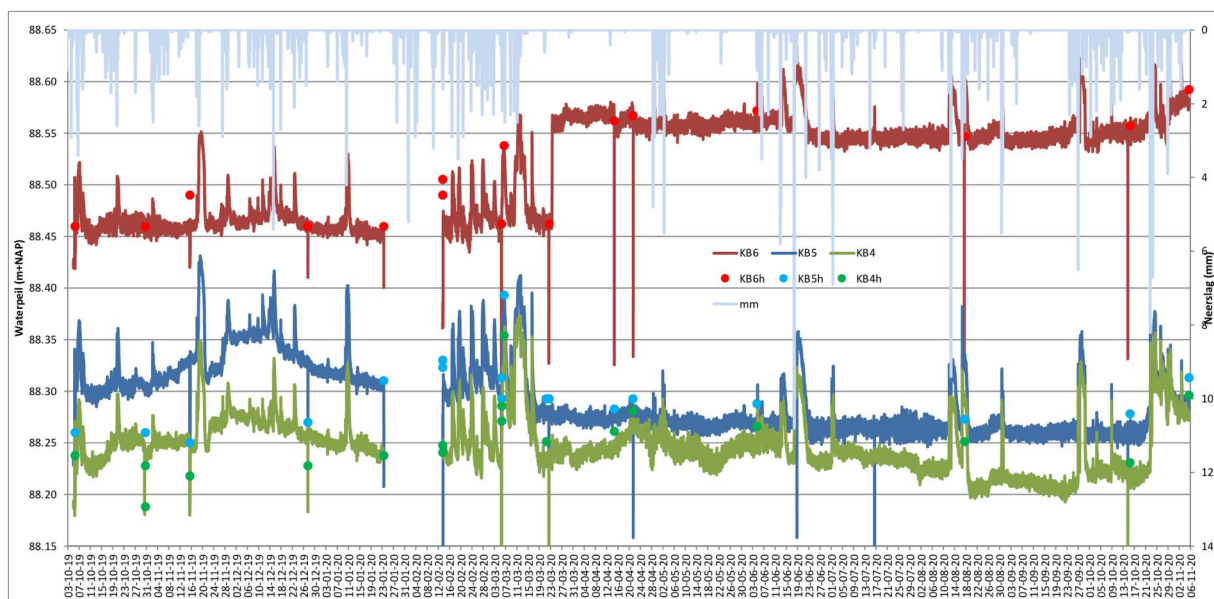
Op 29 juni 2021 is er een extreme bui geweest waarbij het KNMI meetstation Maastricht 380 bij het vliegveld in het stroomgebied van de Keutelbeek een uursom van 67 mm neerslag heeft gemeten. Dit betreft een $T=150$ situatie. Helaas waren de meetpunten in de Keutelbeek tijdens deze extreme situatie niet meer actief. Uit mondelinge mededelingen van de inspecteur van het waterschap zijn er wel problemen geweest met de riolering, maar is het watersysteem van de Siepen- en Gijsbergervloedgraaf, de buffers en de beek in het Kelmonderbos niet overbelast. In de Strabeker Vloedgraaf was op die dag ook een piekafvoer gemeten maar deze was niet zo extreem (statistisch circa $T=2$).

In de periode tussen 13 en 17 juli 2021 is er een langdurige periode geweest met enkele pieken en extreme neerslaghoeveelheden. De neerslag gedurende deze periode heeft geleid tot de ernstige overstromingen in de Geul bij Valkenburg, zoals uitgebreid besproken in nieuwsitems. In die periode zijn er bij het KNMI meetstation Maastricht 380 slechts enkele buien met een uursom van maximaal circa 5 mm gemeten. Dit meetstation is niet representatief en minder geschikt voor deze periode omdat de buien juist iets oostelijker bleven hangen, hetgeen blijkt uit de radargegevens. Volgens Meteobase zijn in de Strabeker Vloedgraaf in die periode buien gevallen met uursommen van maximaal circa 10 mm ($T<0.5$) en een dagsom van 63.7 mm ($T<10$) op 14 juli 2021. Het lijkt erop dat de Strabeker Vloedgraaf in die periode minder extreem is belast.

Dat de neerslagintensiteit en duur niet makkelijk kunnen worden vertaald naar debieten blijkt wel uit de peilmetingen in de Strabeker Vloedgraaf (figuur 4.4). Deze duiden erop dat de peilstijgingen tijdens de gebeurtenissen op 29 juni 2021 en 14 juli 2021 juist het hoogst waren, hoger dan op 17 juni 2020. Dit hangt samen met de duur van de neerslag, de vochttoestand van de bovengrond en de beschikbare berging. Bij de langdurige neerslag van 14 juli 2021 zal de mate van verzadiging van de bovengrond groter zijn geweest en de berging minder. Toch is opvallend dat de gemeten waterpeilen na de pieken steeds weer snel daalden (figuur 4.6).

4.2 Peilmetingen Keutelbeek

Een van de meest waardevolle resultaten van de monitoring vormen de peilmetingen die met grote zorg zijn verwerkt, gecontroleerd, gevalideerd en geanalyseerd. Uit deze peilmetingen kan veel worden afgeleid over het functioneren van de watersystemen, de bronnen en de hydraulische effecten. Voor dit onderzoeksrapport gaat het te ver om in detail in te gaan op alle meetreeksen en alle bijzonderheden die zijn opgevallen. Daarom wordt hier volstaan met bespreking van alleen de meest relevante resultaten. Een uitgebreide set meetreeksen is opgenomen in bijlage 6.



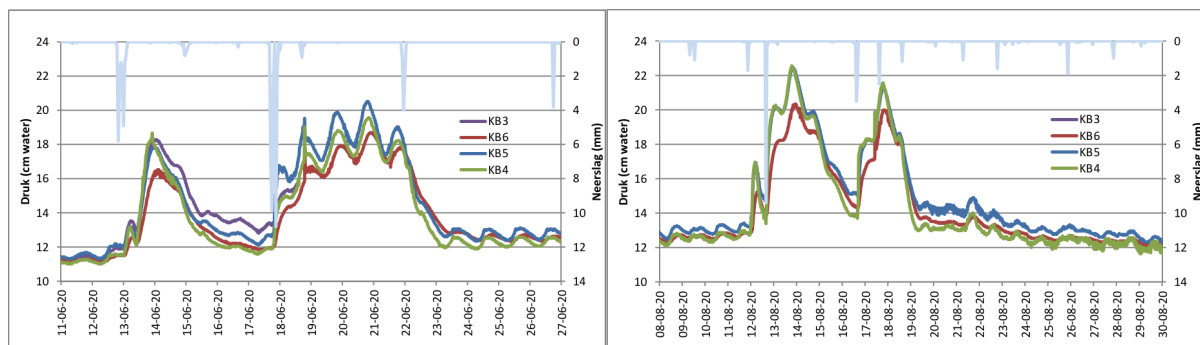
Figuur 4.3. Gemeten waterpeilen bij de meetpunten in de Keutelbeek, gehele meetreeks

Doordat gedurende het onderzoek door het waterschap aanpassingen zijn gedaan aan de buffer Kelmond, die direct bovenstrooms het Kelmonderbos en het onderzoekstraject is gelegen en de invloed daarvan zo groot is geweest werd de analyse van de afvoerdynamiek in de Keutelbeek complex. In feite gaven de meetresultaten vooral weer welke effecten de aanpassingen van de buffer hadden en kon geen onderscheid meer worden gemaakt tussen natuurlijke en gestuurde dynamiek. Voor een goede analyse is inzicht in de activiteiten van het waterschap, de bediening van de spindels (schuiven) en de tijdstippen onontbeerlijk, maar deze waren niet beschikbaar.

In de meetreeksen zitten ook nog enkele verstoringen en onregelmatigheden die niet goed konden worden verklaard. Dit kan gerelateerd zijn aan de afzettingen van sediment in de meetpunten waardoor de loggers minder betrouwbare drukmetingen hebben gegenereerd. Bovendien zijn regelmatig waarnemingen gedaan die wijzen op spelende kinderen, zoals tegels en stenen, waarbij verstoring hebben plaats gevonden.

Desondanks kan uit de meetreeksen worden afgeleid hoe de Keutelbeek in het onderzoekstraject heeft gefunctioneerd en welke invloed dat had op de bodemligging en de samenstelling van het sediment in de bedding. Kort samengevat is uit de combinatie van waarnemingen tijdens de veldverkenningen en de peilmetingen gebleken dat:

- er veel korte pieken zijn en dat regelmatig meerdere pieken kort na elkaar optreden, hetgeen mede wordt veroorzaakt door sturing van de buffers (figuur 4.4);
- de maximale peilstijgingen gering zijn, minder dan 15 cm;
- de peilen niet direct kunnen worden gerelateerd aan de neerslag, mede door de aanpassingen en sturing van de buffer Kelmond;
- de piekafvoeren worden vertraagd en de peilen in het onderzoekstraject langdurig hoger zijn na piekafvoeren, vooral door het geleidelijke leeg laten lopen van de buffers;
- er bij KB4 en in mindere mate bij KB5 een dalende trend is te zien (gevolg van erosie);
- het peil bij KB6 vrijwel stabiel is, de grindsuppletie zorgt voor deze stabiliteit (erosie en sedimentatie meer in evenwicht);
- de peilstijging in alle drie de meetpunten niet geheel kan worden verklaard, maar het gevolg lijkt van opstuwing en/of bodemverhoging veroorzaakt door de piekafvoer van 22 oktober 2020.



Figuur 4.4. Gemeten druk bij de meetpunten in de Keutelbeek, tijdens 2 piekafvoeren

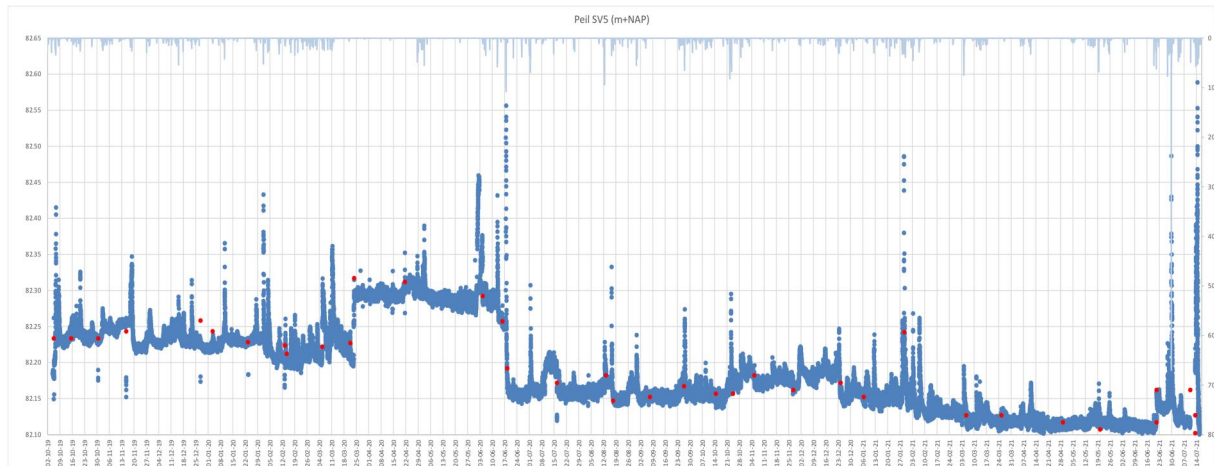
4.3 Peilmetingen Strabeker Vloedgraaf

Vanwege de grote afvoer- en morfodynamiek in de Strabeker Vloedgraaf die reeds bij de eerste veldverkenningen is signaleerd is gaandeweg het onderzoek steeds meer nadruk gelegd op de gedetailleerde peilmetingen. Door de BACI-monitoring waarbij in het onderzoekstraject 3 meetpunten op korte afstand zijn geplaatst was het mogelijk om goede vergelijkingen te maken tussen de meetreeksen. Dit was een belangrijke pijler bij de validatie van de meetgegevens en de interpretatie. Zodoende was het mogelijk om de dynamiek en de reactiesnelheid van het watersysteem te bepalen. Ook was het mogelijk om te achterhalen waar de voornaamste bronnen waren.

Met de peilmetingen zijn de uitgangssituatie voorafgaand aan de maatregelen, de effecten van de maatregelen en de effecten van de piekafvoeren bepaald. Hiermee is geregistreerd hoe piekbuien door het watersysteem worden verwerkt, inclusief de piekbui van 17 juni 2020. Toch waren er tot eind juni 2021, bij het geplande einde van de monitoring te weinig vergelijkbare buien geweest om goede conclusies te trekken.

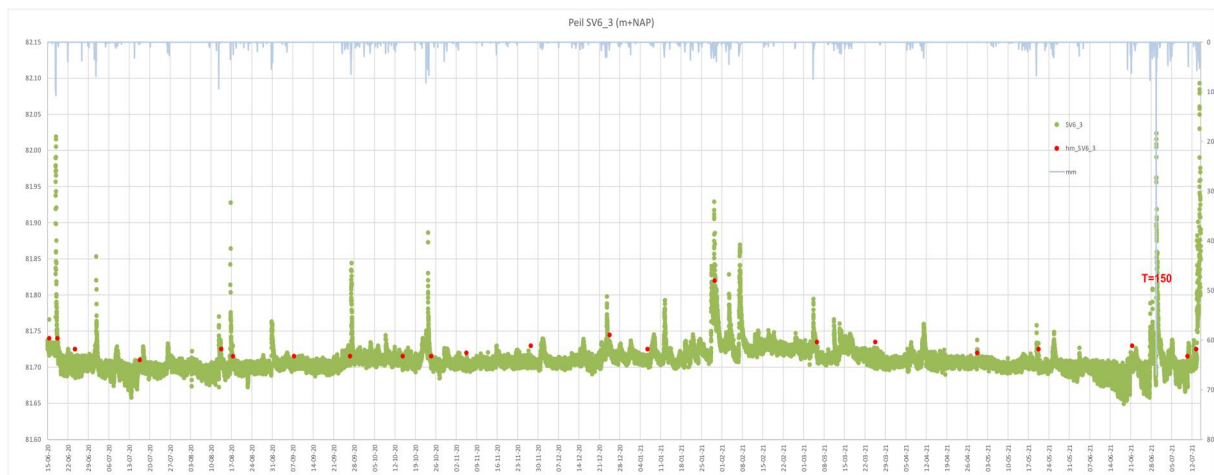
Vanwege het uitblijven van voldoende piekafvoeren om de maatregelen goed te evalueren is in juli besloten om de monitoring te hervatten en te intensiveren door meer meetpunten te plaatsen in de zijtaken en bij de overstorten. Dit is gebeurd op 13 juli 2021, op basis van de weersverwachtingen. Hierdoor zijn gedurende de periode van 13 tot 16 juli 2021 waterpeilen gemeten met een interval van 5 min in het experimentele traject, de belangrijkste bronnen; de Kleinhaasdalervloedgraaf en de Vloedgraaf op de voorste Brummenkuil en de zijtak van de Berkenhofbeek bij de Carexweide. Hieruit is gebleken dat de buien van 29 juni 2021 en 14 juli 2021 tot grotere peilstijgingen en debieten hebben geleid dan de korte bui van 17 juni 2020 (figuur 4.5).

Het gaat te ver om alle meetreeksen en bijzonderheden in detail te bespreken. Daarom worden hier alleen de meest relevante resultaten benoemd en wordt voor meer gegevens verwezen naar bijlage 6.



Figuur 4.5. Gemeten waterpeil bij meetpunt SV5 (bovenstrooms suppletie), gehele meetreeks

De plotselinge peilstijging van 10 cm op 23 maart 2020 is het gevolg van de aanleg van de grind-suppletie en de plotselinge daling op 17 juni 2020 is het gevolg van de volledige verdwijning ervan.



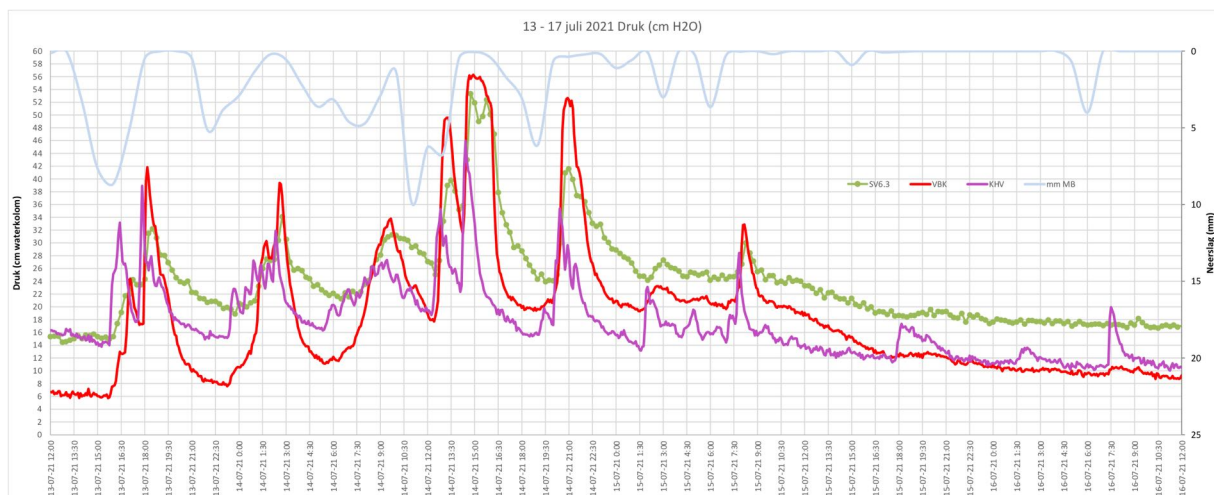
Figuur 4.6. Gemeten waterpeil bij meetpunt SV6.3 (benedenstrooms suppletie), vanaf 15 juni 2020

Uit de meetreeksen valt onder andere op dat:

- er veel korte grote pieken zijn gedurende het hele jaar, niet alleen in de zomers;
- het nominale peil in perioden zonder neerslag vrijwel constant is;
- er weinig langere perioden zijn met een constant verhoogd peil;
- de peilen na piekafvoeren weer snel dalen tot de nominale waarden (baseline);
- de peilfluctuaties niet direct kunnen worden gerelateerd aan de neerslag, de pieken geven geen goede correlatie met de neerslagintensiteit;
- het peil bij meetpunt SV4, bovenstrooms het meetschot en de staalplaat stabiel is;
- er bij SV5 een dalende trend is te zien als gevolg van erosie, met een extra sterke daling op 17 juni 2020;
- het peil bij SV6 vrij stabiel is, erosie is min of meer in evenwicht met de aanvoer van sediment.

Dat de pieken in de peilen geen goede correlatie hebben met de neerslagintensiteit is te verklaren door verschillen in de vochttoestand, de verzadigingsgraad van de bodem en de beschikbare berging (oppervlakkig en in de bodem). Deze variabelen zijn echter zeer moeilijk te bepalen. Dit is wel in de aandacht bij het programma "Water in Balans" oa bij onderzoek naar aardappeldrempels. Daarnaast spelen de overstorten en de oppervlakkige afstroming van verharde oppervlakken een rol en deze zijn gerelateerd aan het functioneren van en de uitgangssituatie in het rioelstelsel.

Het lijkt erop dat het hemelwater op 17 juni 2020 zo snel afstroomde dat geen infiltratie plaats kon vinden en de verzadiging van de bodem niet werd bereikt. Dit zou ook de verklaring kunnen zijn van de vele pieken en met name de weer snelle diepe dalen na een bui, ook tussen 13 en 16 juli 2021. Dit is sterker bij de Kleinhaasdalervloedgraaf waar geen buffer is en er eerder en sneller stijgingen en dalingen optraden. Bij de Vloedgraaf op de Voorste Brummenkuil is er langer sprake van verhoogde peilen ten gevolge van de buffer en dit is ook bij meetpunt SV6 benedenstrooms in het onderzoekstraject gemeten.



Figuur 4.7. Gemeten druk bij meetpunten SV5, SV6.3 en overstorten, bij de bui van 14 juli 2021

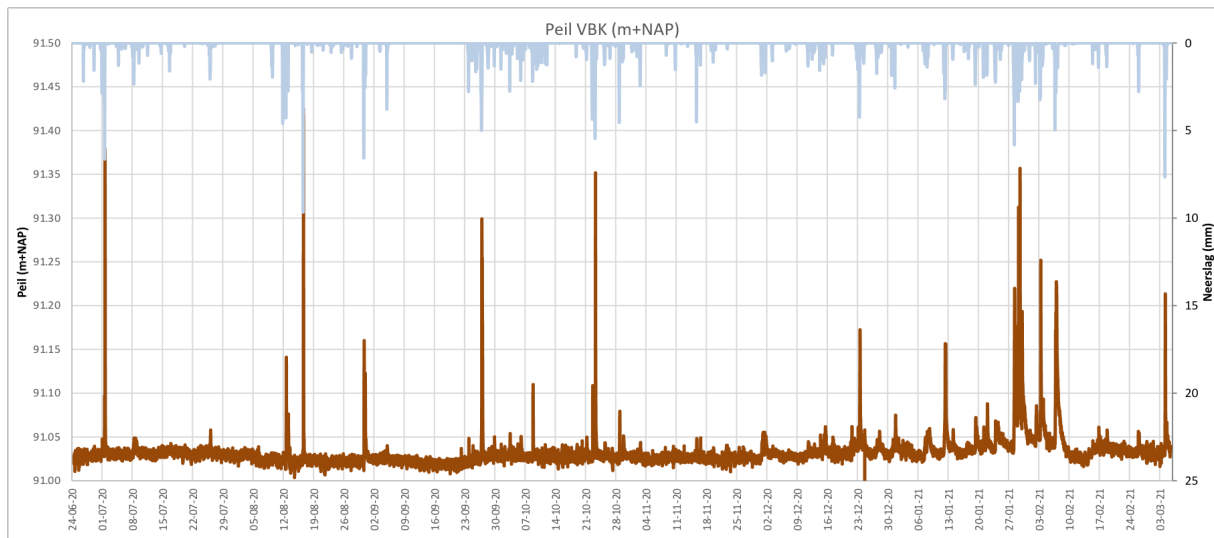
Uit de bovenstaande figuur kan worden afgeleid hoe de dynamiek van de overstorten is en welke invloed de buffers hebben. Voor een meer gedetailleerde analyse en goede interpretatie zijn de lokale waarnemingen noodzakelijk en met name gegevens van de riolering (capaciteit en draaiuren van de pompen). Helaas was het niet mogelijk om ook aanwezig te zijn tijdens de piekbuien van 14 juli 2021.

Uit de reeks van het meetpunt in de Voorste Brummenkuil blijkt dat het peil een bepaalde limiet bereikte op 14 juli 2021 om 14:45 uur en om 20:45 uur. Waarschijnlijk was dat het moment waarop de duiker geheel was gevuld en de afvoer door de duiker beperkend werd. Uit de langere en bredere pieken vergeleken met de pieken in de Kleinhaasdalervloedgraaf blijkt ook het effect van de buffer, de amplitude wordt wel gedempt maar de duur van de hydraulische stress en de schuifspanningen wordt langer.

Uit de reeks van het meetpunt in de Kleinhaasdalervloedgraaf blijkt dat ook na de buien nog sprake is van lozingen op 15 juli 2021, vermoedelijk betreft dit de leegloop van het rioelstelsel, hetgeen ook op 16 juli 2021 is waargenomen. Het is daar wel erg hevig aan toe gegaan, want er is een peilstijging gemeten van circa 40 cm (figuur 4.7), terwijl het meetpunt op een helling lag.

Uit de peilmetingen bij de monding van de buffer in de Vloedgraaf in de Voorste Brummenkuil blijkt duidelijk dat de frequentie van piekafvoeren groot was (figuur 4.8). Er waren tenminste 10 grotere pieken gemeten in een periode van 9 maanden. Met de huidige monitoring en meetgegevens is niet geheel duidelijk vast te stellen welk aandeel de overstort heeft gehad maar het lijkt erop dat niet aan de basisinspanning en/of de KRW wordt voldaan.

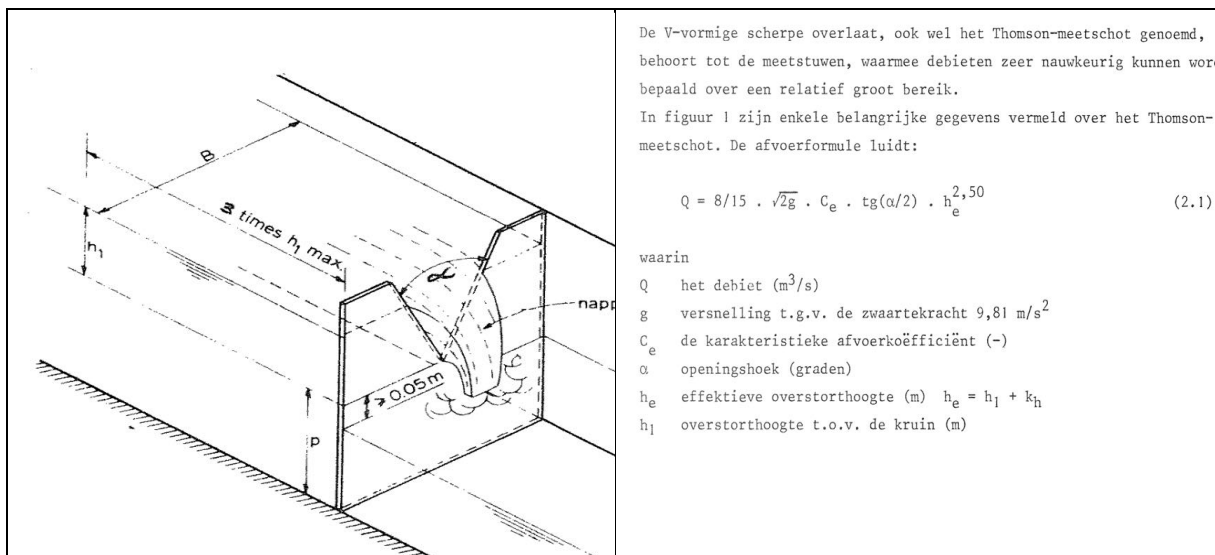
Daarnaast is er bij de uitlezingen ook een vrijwel permanente afvoer waargenomen van circa 1 à 2 l/s. Dit kan mogelijk het gevolg zijn van bronnen, maar kan ook duiden op het geleidelijk leeglopen of lekverlies van het rioelstelsel.



Figuur 4.8. Gemeten waterpeil bij meetpunt VBK (benedenstrooms buffer Voorste Brummenkuil)

4.4 Debietmeting Strabeker Vloedgraaf

Aangezien de erosie wordt veroorzaakt door piekafvoeren is het noodzakelijk om de relatie te onderzoeken tussen de afvoeren, de stroomsnelheden, de sedimenttransportcapaciteit en de verandering van de beddinggeometrie. De ervaringen in o.a. de Lunterse Beek (Laseroms, 2013, Eekhout, 2014) leren dat dit dient te gebeuren tijdens piekafvoeren. Aangezien de piekafvoeren niet zijn te voorspellen is een continue monitoring toegepast. Hiertoe is benedenstrooms meetpunt SV4 een Thomson meetschot met dataloggers boven- en benedenstrooms geplaatst om ook eventuele verdrinking te meten met meetfrequentie van 15 minuten.



Figuur 4.9. Debietmeting met een Thomson meetschot.

Verder is getracht met een nauwkeurige bepaling van de geometrie de afvoer en de verandering van de beddinggeometrie van een kort traject te bepalen uit de gemeten peilen. Deze methode is toegepast om de metingen te kalibreren en te valideren. Hiermee kon ook globaal worden bepaald hoe de ruwheid varieerde.

De debietmeting met het meetschot verliep zoals de bedoeling was totdat het meetschot bij de piekafvoer van 17 juni 2020 achterloops raakte. Toen dit werd waargenomen is het meetschot direct verwijderd om de oevererosie zoveel mogelijk te beperken.

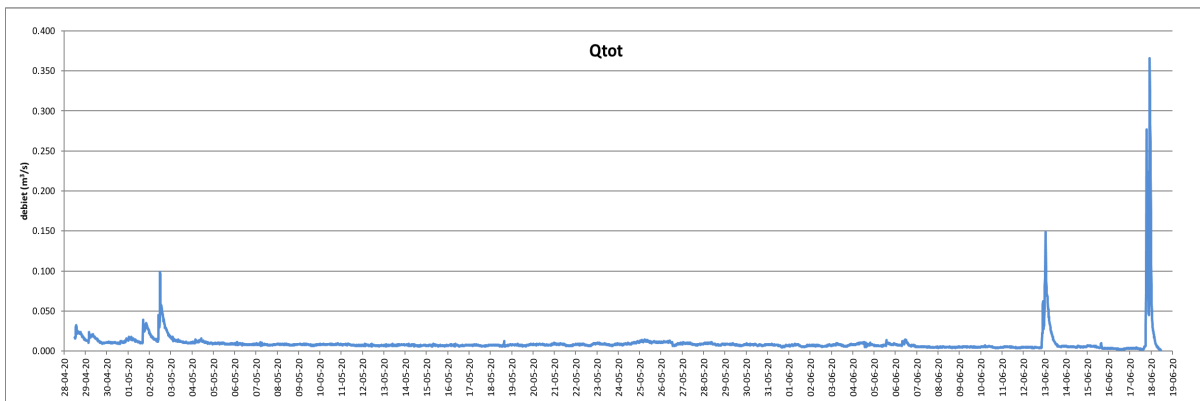


Meetstuw debietmeting 19:19 (zomertijd)

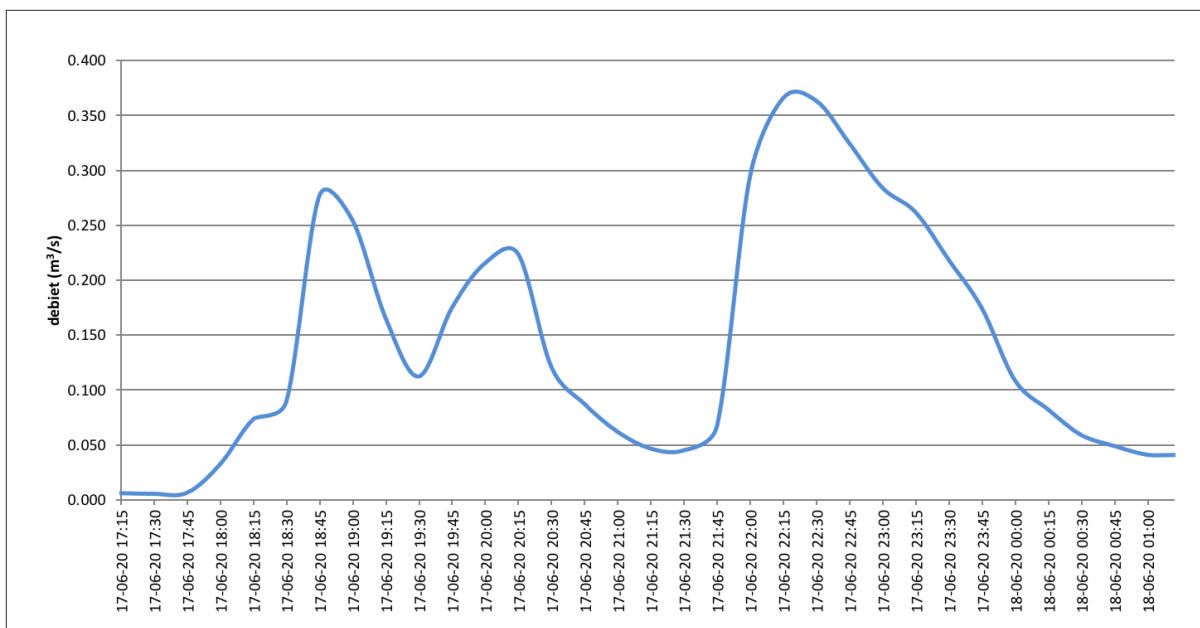


Meetstuw achterloops 21:06 (zomertijd)

Uiteindelijk zijn betrouwbare metingen verkregen vanaf 28 april 2020 tot de piekafvoer van 17 juni 2020 waarbij de meetstuw achterloops is geraakt (om circa 20:00 uur GMT). Mede met behulp van een vereenvoudigd SOBEK-model zijn de verstoorde metingen gecorrigeerd en is de meetreeks verlengd tot 18 juni 2020 (Figuren 4.10 en 4.11).



Figuur 4.10. Gemeten debieten bij de meetstuw (inclusief achterloopsheid en verwijdering)

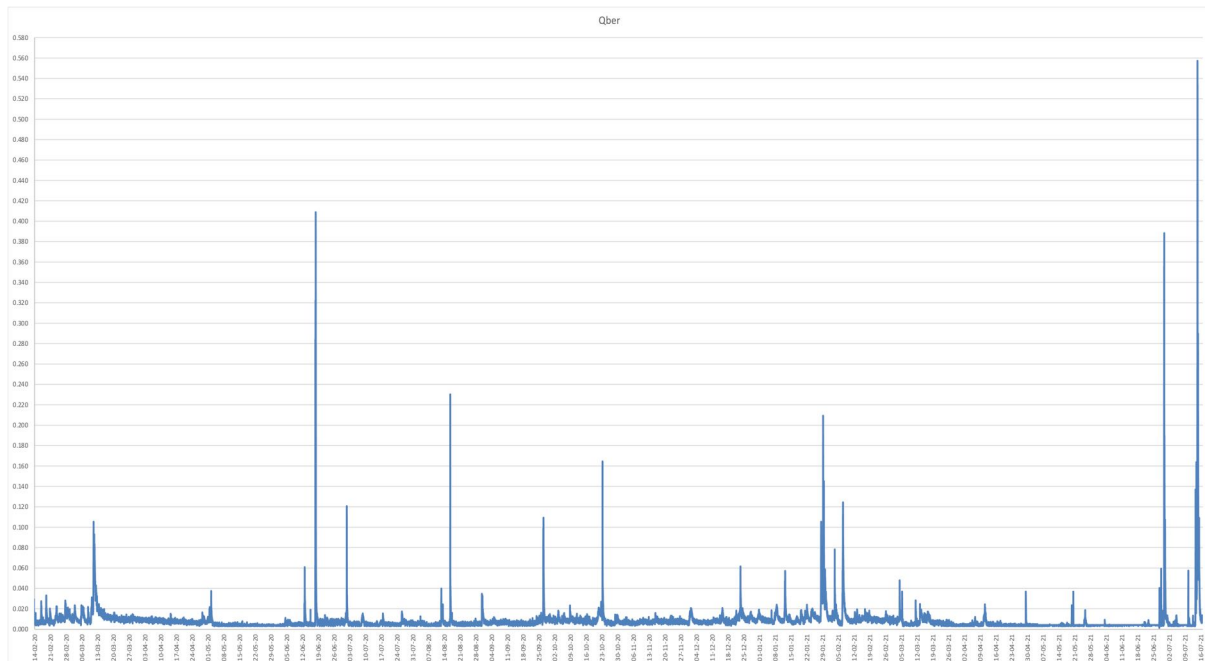


Figuur 4.11. Gemeten debieten bij de meetstuw tijdens de piekafvoer van 17 juni 2020

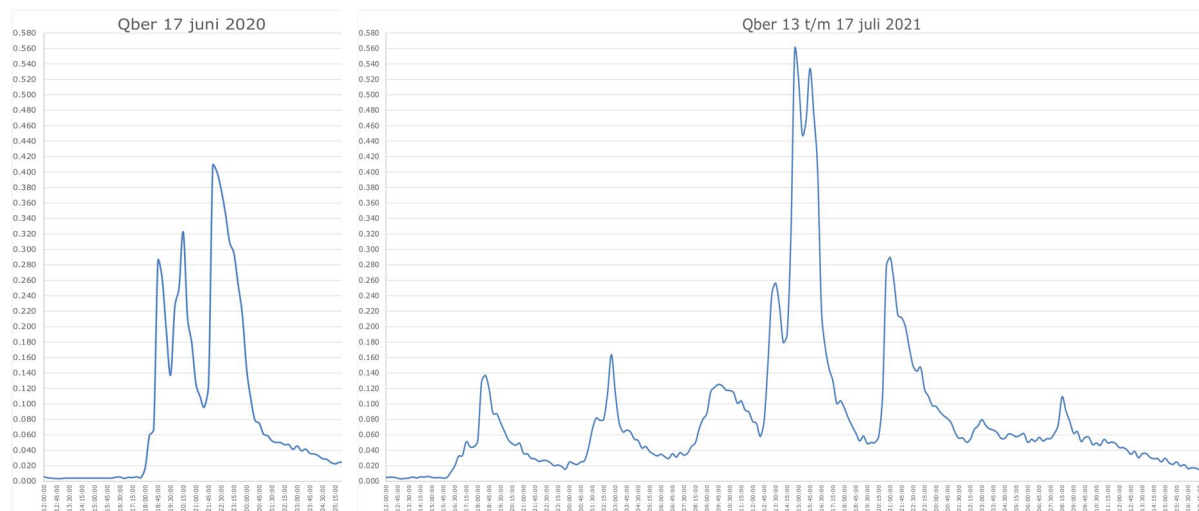
Met de gemeten Qh-relaties van de relatief korte debietmeetreeks is een benaderende reeks met debieten vervaardigd van de gehele monitoringperiode door interpolatie en extrapolatie (figuur

4.12). Deze is vervolgens gevalideerd met een SOBEK-model door vergelijking van de gemeten en berekende waterpeilen (bijlage 7).

Aangezien voor de debietbepaling wordt uitgegaan van het niet door de maatregelen beïnvloede meetpunt SV6 is de vergelijking van het peil in dat meetpunt maatgevend geweest. De kalibratie en validatie is nog niet perfect, maar de pieken van 29 juni 2021 en 14 juli 2021 worden zeer goed benaderd. Op basis hiervan mag worden afgeleid dat de schatting van het debiet gedurende 2021 goed is gelukt. Zodoende zijn de onderstaande debietreeksen verkregen. Hierbij wordt opgemerkt dat de basisafvoer aan het einde van de meetreeks ten onrechte nihil wordt als gevolg van de verandering van de bodem bij meetpunt SV6. Deze daling is nog niet voldoende in de Qh-relatie verdisconteerd.



Figuur 4.12. Berekende debieten bij de meetstuw van de gehele monitoringperiode



Figuur 4.13. Met metingen en modelberekeningen verkregen debieten tijdens extreme buien

Uit de vergelijking van de gegenereerde debietreeksen blijkt dat de debieten op 14 juli 2021 niet alleen hoger waren, maar ook langer duurden en dat de basisafvoer gedurende de gehele reeks buien verhoogd bleef. Bij de piekafvoer van 17 juni 2020, na een droge periode waren de pieken intenser (sneller stijgend), met diepere en snellere dalingen. Dit toont aan hoe lastig het is om een peilstijging, een debiet en een morfologische verandering te relateren aan de kenmerken van een bepaalde bui. Er zijn nog geen goede correlaties gevonden, maar positief is dat we twee zeer verschillende extreme situaties hebben kunnen meten. Het lijkt er overigens op dat het hemelwater

op 17 juni 2020 zo snel afstroomde dat geen infiltratie kon plaats vinden en de verzadiging van de bodem niet werd bereikt. Dit kan ook de oorzaak zijn van de vele pieken en met name de weer snelle diepe dalen na een bui. Dit speelde mogelijk ook bij de buien tussen 13 en 16 juli 2021. Onduidelijk is in hoeverre de verzadiging van de bodem hierop invloed heeft gehad. Met meer gedetailleerde radarbeelden van de neerslag en de gegevens van andere onderzoeken in de omgeving in het kader van "Water in Balans" zou dit mogelijk nog nader kunnen worden bepaald.

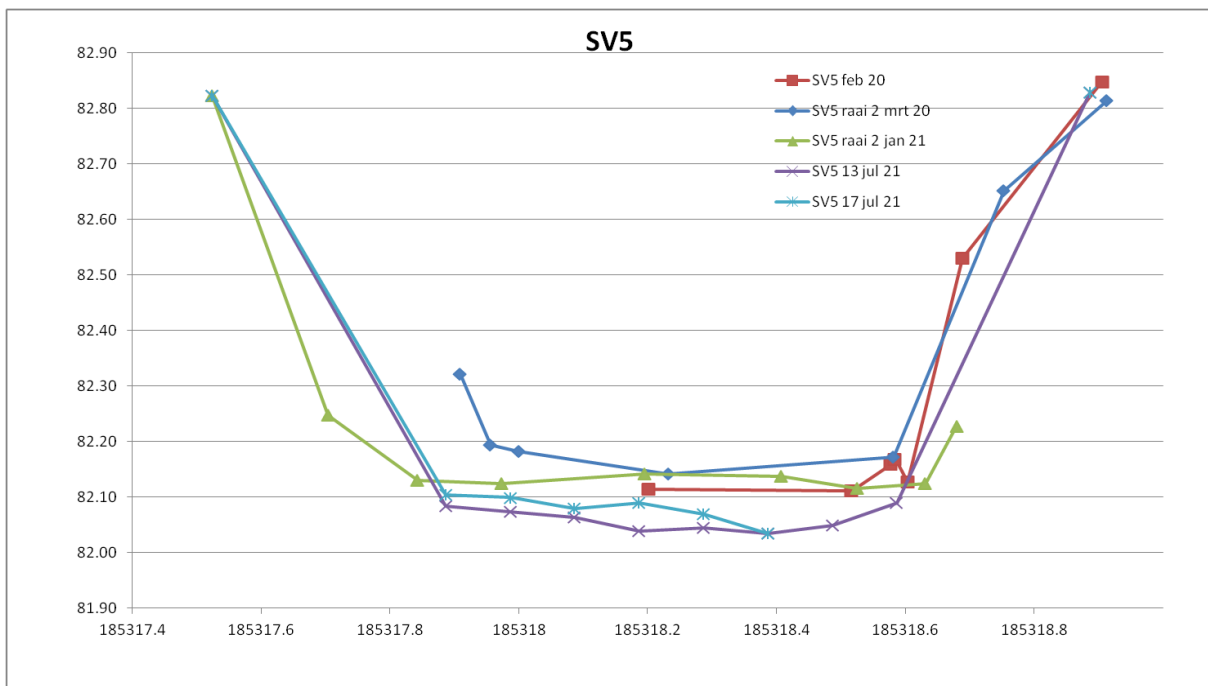
4.5 Metingen erosie Strabeker Vloedgraaf

Reeds bij de veldverkenningen is gebleken dat de erosie in de bedding zeer dynamisch is een grote ruimtelijke en temporele variatie kent. Dit is ook sterk afhankelijk van de op een bepaald moment optredende stroming, stroomsnelheden en schuifspanningen. Deze zijn zeer moeilijk gedetailleerd te meten en misschien is dit zelfs onmogelijk. Daarom is getracht in ieder geval een globale indruk te krijgen door een combinatie van meerdere methoden, namelijk met behulp van hoogtemetingen, erosiebouten, peilmetingen, maar ook visuele waarnemingen en kwalitatieve beschrijvingen.

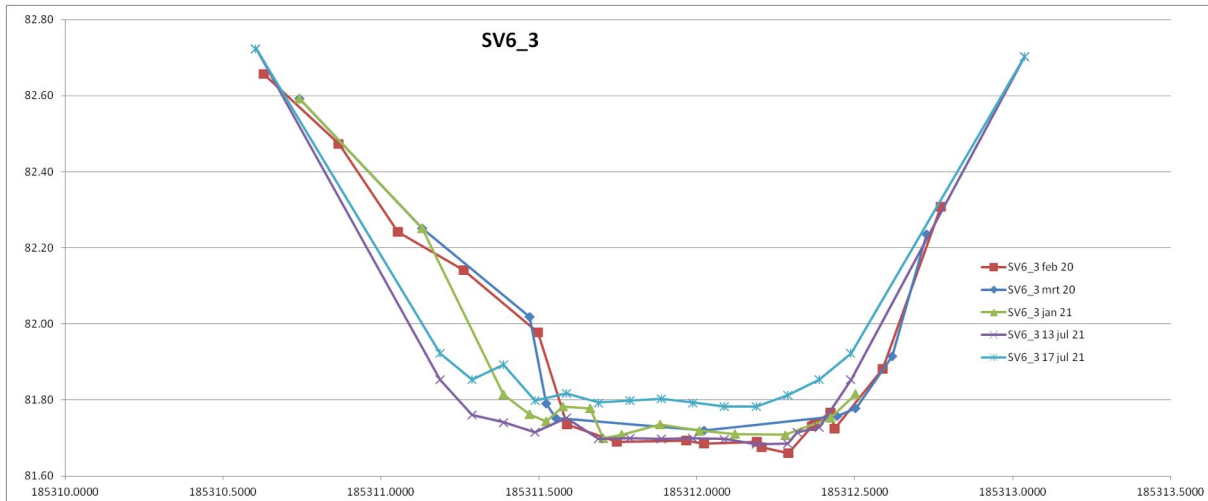
Uit de combinatie van de toegepaste methoden is gebleken dat de minder intense bui(en) rond 14 juli 2021 tot grotere en langduriger peilstijgingen en debieten hebben geleid dan de kortere meer intense buien van 17 juni 2020 en 29 juni 2021. Doordat de bui van 14 juli 2021 uit meerdere opeenvolgende buien bestond en langer duurde zijn de morfologische veranderingen ook groter. Door de vele ingestorte oevers die daarvan het gevolg zijn geweest en hebben geleid tot een tijdelijke extra hoeveelheid sediment en kortstondige veranderingen van de bodemhoogten is dat echter nog moeilijk te bepalen.

Uit de handmetingen van de dwarsprofielen bij de meetpunten SV5 en SV6 op 13 juli 2021 volgt dat de bodem zich geleidelijk iets heeft verdiept ten opzichte van januari 2021. Uit de vergelijking met de metingen van 16 juli 2021 blijkt dat de bodem, als gevolg van de buien tussen 13 en 16 juli 2021 en extra aanvoer van sediment, waarschijnlijk mede door het instorten van oevers weer iets is verhoogd. Daarnaast lijkt de beddingbodem zich te hebben verbreed. Dit komt onder andere tot uiting in de vele waarnemingen tijdens de veldverkenningen en de onderstaande deels handmatig ingemeten dwarsprofielen (figuren 4.14 en 4.15).

In bijlage 8 zijn meer gegevens van de erosiemetingen opgenomen (en in bijlage 9 Lisem).



Figuur 4.14. dwarsprofielmetingen in meetpunt SV5



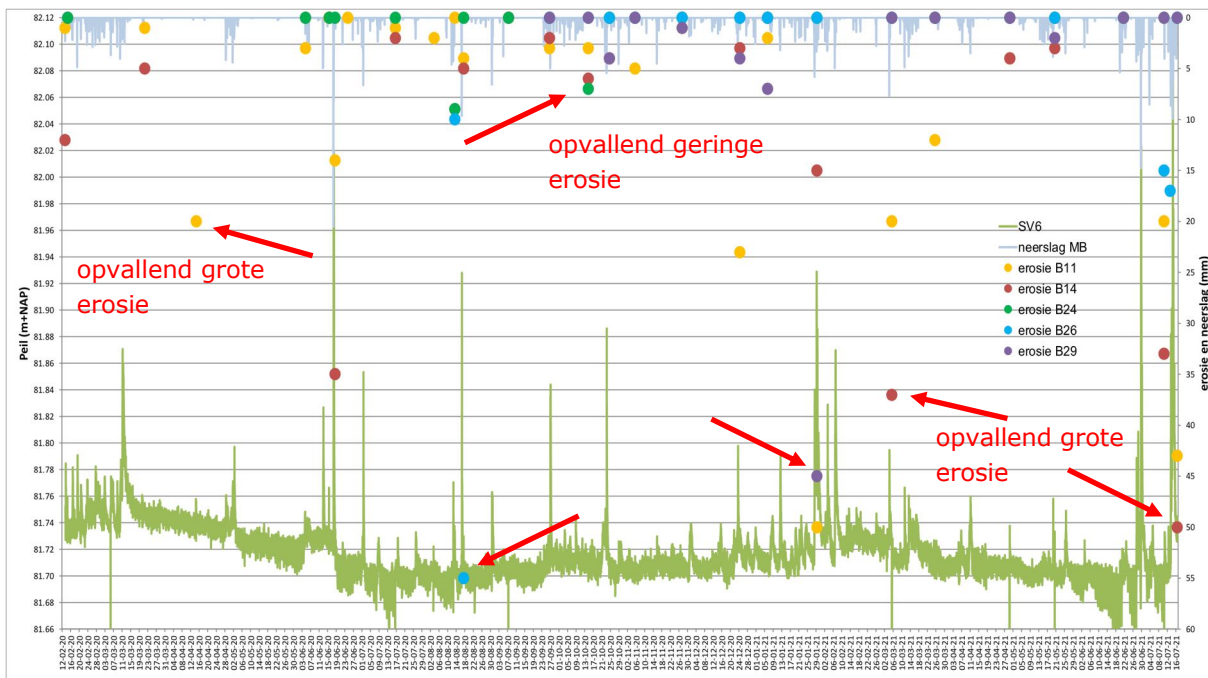
Figuur 4.15. dwarsprofielmetingen in meetpunt SV6

Voor een meer gedetailleerde analyse van de morfodynamiek en de erosie zijn ook de metingen bij de erosiebouten bestudeerd. In onderstaande figuur 4.16 is getracht de resultaten daarvan te visualiseren in relatie tot de gemeten peilen bij meetpunt SV6 en de neerslag (van Meteobase).

Belangrijk is op te merken dat de metingen met de erosiebouten (meer dan 50, zie bijlage 5) slechts een grove indicatie geven van de erosie om de volgende redenen:

- het lokale stroombeeld kan sterk verschillen bij variërende afvoeren, mede door meegevoerde takjes en blad;
- als ze bedekt worden door sediment zijn ze niet zichtbaar en kan niet worden bepaald of in de tussenliggende periode erosie is opgetreden die dan niet wordt waargenomen;
- als ze eenmaal dagzomen door erosie hebben ze zelf invloed op het stroombeeld en kunnen ze erosie versnellen.

Daarom moeten de met de erosiebouten gemeten waarden worden gecontroleerd en gevalideerd met andere metingen, zoals de GPS-metingen van de beddingbodem en de visuele waarnemingen.



Figuur 4.16. Metingen van de erosiebouten in relatie tot het peil in meetpunt SV6 en de neerslag

Uit de metingen van de afzonderlijke erosiebouten valt op dat er grote verschillen zijn die niet goed kunnen worden verklaard met behulp van de peilmetingen en de neerslag. Zo is er opvallend veel erosie gemeten bij bout B11, in de leem in de bocht benedenstrooms meetpunt SV6, op 14 april

2020, na een lange droge periode, terwijl er opvallend weinig erosie is gemeten na de piekafvoeren van 11 maart 2020 en 17 juni 2020. Helemaal opvallend zijn de meting van de grootste erosie tijdens de inmeting van de beddingbodemp op 29 januari 2021 en minder grote erosie op 16 juli 2021. Waarschijnlijk speelt hierbij de lokale verandering van het stroombeeld een grote rol.

De erosie bij bout B14, in de leem bovenstrooms SV5, is veel minder grillig en lijkt vrijwel direct gerelateerd aan de piekafvoeren.

Uit meer gedetailleerde analyse van de meetreeksen blijkt dat er desondanks wel een duidelijke algemene trend is, namelijk dat de mate van erosie gerelateerd is aan de duur van de piekafvoer. Langere piekafvoeren leiden tot meer erosie.

Er is slechts een beperkte correlatie tussen de peilmetingen en de metingen bij de erosiebouten. Dit verschilt namelijk per bout en er zijn grote verschillen die niet kunnen worden verklaard. Bij de piekafvoeren van 17 juni 2020, 27 juni 2021 en 14 juli 2021 is de erosie bij bouten B11 en B14 duidelijk het grootst. Bij de bouten B24, B26 en B29 is de erosie grilliger. Dit bevestigt wel het algemene beeld uit de visuele waarnemingen dat de erosie groter is naarmate de hogere afvoeren langer duren.

4.6 Relatie met macrofauna

Onderzoek naar de effecten van de piekafvoeren en de maatregelen op de macrofauna in de beek is alleen een optioneel onderdeel van het onderzoek geweest en buiten beschouwing gebleven door gebrek aan tijd en middelen bij het waterschap. Er is wel een inschatting van de effecten gemaakt op basis van de gemeten peildynamiek en de gerelateerde hydraulische stress, de mobiliteit van het beddingmateriaal, visuele waarnemingen en deskundigenoordeel.

Voor de levensgemeenschappen in de bedding zijn alle milieufactoren of sleutelfactoren, zoals: temperatuur, zuurstof, zuurgraad, stroming en substraat (beddingmateriaal) van belang. Dit laatste is sterk variërend zowel ruimtelijk als temporeel en misschien wel het grootste verschil tussen de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf.

Keutelbeek

Uit de quickscan van de Keutelbeek bleek dat vooral slibindicerende organismen in verhoogde mate aanwezig waren. Dat er waarschijnlijk weinig kenmerkende soorten waren wordt veroorzaakt door het ontbreken van geschikt substraat. Dit komt doordat in de Keutelbeek sedimentatie dominant is gedurende normale omstandigheden. De weinige aanwezige harde substraten betreffen resten van tegels en stenen, grind komt weinig voor. Wat dat betreft is de grindsuppletie in de Keutelbeek mogelijk een positieve aanvulling maar alleen zolang de stroomsnelheden voldoende hoog zijn. Indien de stroomsnelheden gedurende lange tijd te gering zijn zal op den duur ook het grind worden bedekt door slib. Voor de populaties in de bronbeekjes en de individuele bronnen in de bedding is de sedimentatie van slib ongewenst. Gelukkig is de maximale peilstijging beperkt tot circa 15 cm en daardoor ook de reikwijdte van de sedimentatie. Bronnen die hoog genoeg zijn gelegen zullen waarschijnlijk niet direct nadelig worden beïnvloed, maar mogelijk wel op langere termijn, indirect indien de bodem van de beek zich dieper insnijdt en de voeding van de bronnen afneemt.



Fijn slib zet zich af



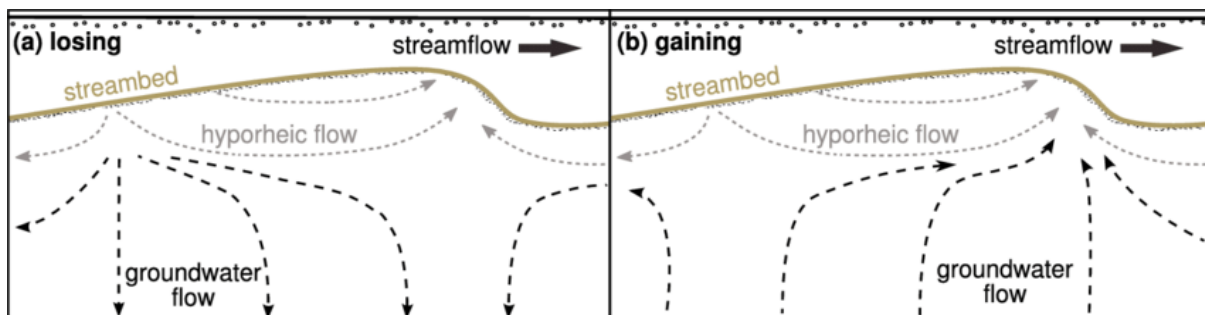
Afgezet slib bovenstrooms grindsuppletie

Strabeker Vloedgraaf

Uit de monitoring van de Strabeker Vloedgraaf is gebleken dat de hydraulische stress en de erosie in de bedding zeer dynamisch zijn en er sprake is van grote ruimtelijke en temporele variatie. Door deze variatie zijn er bij normale afvoeren altijd wel plekken waar de stroming en sedimenttransport minder groot zijn. Tijdens de piekafvoeren die zijn waargenomen was de stroming echter zo hard en turbulent dat het rollen van grind en stenen hoorbaar was. Hierdoor werden op enkele plaatsen delen van de beddingbodembodem verplaatst en verstoord, inclusief grotere stenen. Dit zal ongetwijfeld grote invloed hebben op de milieufactoren en de organismen in de beekbedding.

Als de habitat zelf ten dele wordt getransporteerd is de stress voor de daarin levende organismen waarschijnlijk ook te groot voor een gezonde duurzame populaties. Aangezien deze situatie niet alleen optreedt bij enkele zeer extreme piekafvoeren maar ook al bij minder extreme grotere afvoeren is de frequentie van de verstoring meerdere keren per jaar en waarschijnlijk te groot. Daarnaast beïnvloeden de piekafvoeren niet alleen de hydromorfologische factoren zoals de variatie in structuur en stabiliteit van de substraat- en habitatmozaïeken en de samenstelling van het beddingmateriaal maar ook de overige milieufactoren zoals de stroming, waterkwaliteit, temperatuur, het zuurstofgehalte en de zuurgraad. Deze kunnen direct en indirect worden beïnvloed op korte en lange termijn en op verschillende schalen.

Met betrekking tot de effecten op stroming moet bovendien onderscheid worden gemaakt tussen de stroomsnelheid en schuifspanning (turbulentie in de grenslaag en drift), de mate van beïnvloeding van de oevers en zijbeken (bronnen) en uitwisseling van het water met het onderliggende grondwater (hyporheïsche zone, figuur 4.17). Voor de diverse bronnen en bronloopjes die dicht bij de beek zijn gelegen kunnen een peilstijgingen van enkele decimeters grote effecten hebben. De organismen in de bronloopjes die gevoed worden door grondwater met een lage temperatuur zijn zeer gevoelig voor zuurstof- en temperatuurschommelingen en de temperatuur van water tijdens piekafvoeren en vooral uit riooloverstorten is vaak aanzienlijk hoger en bevat minder zuurstof. Verder kennen de bronloopjes een vrij constante voeding met weinig dynamiek, een substraat van blad, grover organisch materiaal en soms hardere substraten. Deze zijn gevoelig voor stroming en ook voor bedekking met fijn slib dat via de vloedgraven wordt aangevoerd.



Figuur 4.17. Schematisatie van de hyporheïsche zone

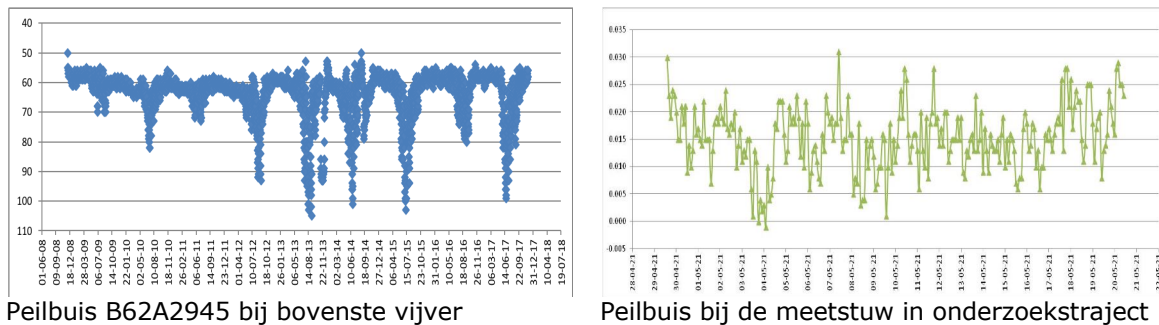
4.7 Relatie grondwater Strabeker Vloedgraaf

Vanwege de zorg van het deskundigenteam Heuvellandbeken dat diepe insnijdingen kunnen leiden tot verdroging en achteruitgang van natuurwaarden in de aanliggende Natura2000 gebieden is getracht toch ook de relatie met het grondwater te onderzoeken. Uit de inventarisatie tijdens de watersysteemanalyse is al gebleken dat er in de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf zeer weinig (meet)gegevens beschikbaar zijn van de stijghoogten en de geologische bodemopbouw. Ook verzoeken aan derden hebben niets opgeleverd. Uit de weinige gegevens die er zijn blijkt dat de meeste peilbuizen te diep staan (> 10 m-mv) om een relatie met de beekpeilen te leggen. Ook zijn in de stijghoogten van deze peilbuizen geen trends gesignaleerd zoals seizoensinvloeden of dalende grondwaterstanden.

Een uitzondering vormt peilbuis B62A2945 die zich bij de bovenste vijver bevindt, freatisch meet met een filter tot 1.55 m-mv dat in zwak zandige leem staat. Uit de meetreeks (figuur 4.18) blijkt dat sprake is van een dalende trend en langdurig lage waterstanden in de zomers van 2013, 2014 en 2015. Helaas ontbreken meer recente data. Mogelijk is er een verband met het waterpeil in de nabij gelegen vijver en aanpassingen van de stuw.

Om toch iets te kunnen zeggen over de grondwaterstanden is in een later stadium een peilbuis geplaatst in het onderzoekstraject van de Strabeker Vloedgraaf. Deze is geplaatst bij de meetstuw tot een diepte van 2.40 m-mv, dat is circa 20 cm beneden de beekbodem. Tot die diepte is tijdens de boring geen grondwater waargenomen. Ook bij de laatste veldverkenning op 12 november 2021 was geen grondwater in de peilbuis aanwezig.

Uit de meetreeks en handmetingen blijkt dat er in de meetperiode van april tot november 2021 ook geen water in de peilbuis heeft gestaan. De geringe fluctuaties van enkele mm tot maximaal 3 cm zijn het gevolg van kleine meetfouten van de logger en onnauwkeurigheden in de compensatie. Dit toont aan dat de grondwaterstand zich onder de beekbodem bevond. Dit betekent dat de beek in de monitoringperiode niet drainerend was, maar het water in de bedding eerder infiltreerde. Dit kan ook mede hebben bijgedragen aan de geringe waterdiepte in de beek.



Figuur 4.18. Peilbuismetingen van freatische waterstanden langs de Strabeker Vloedgraaf

Op basis van de vele veldwaarnemingen en de uit de peilmetingen afgeleide afvoerdynamiek lijkt de Strabeker Vloedgraaf in de hele bovenloop weinig grondwater te ontvangen, behalve uit de (kalktuf)bronnen. Daarom vallen grote delen van de bovenlopen droog en is de basisafvoer beperkt tot circa 5 l/s. De aangetroffen ondergrondse gangen en afvoer zijn ook voorbeelden daarvan.

Er lijken in principe 2 sterk overheersende regimes te zijn, namelijk de constante basisafvoer van minimaal circa 5 l/s door de voeding van de vele bronnen en de afvoeren bij flinke buien boven circa 100 l/s. Er zijn geen langdurige perioden met een verhoogde afvoer ten gevolge van een langduriger natte periode. Zelfs gedurende de periode met diverse piekafvoeren tussen 13 en 16 juli 2021 daalt de afvoer binnen enkele uren weer tot circa 40 l/s. Dit zijn weer aanwijzingen dat de beek niet veel water ontvangt vanuit het grondwater en de beek niet zo sterk drainerend is.

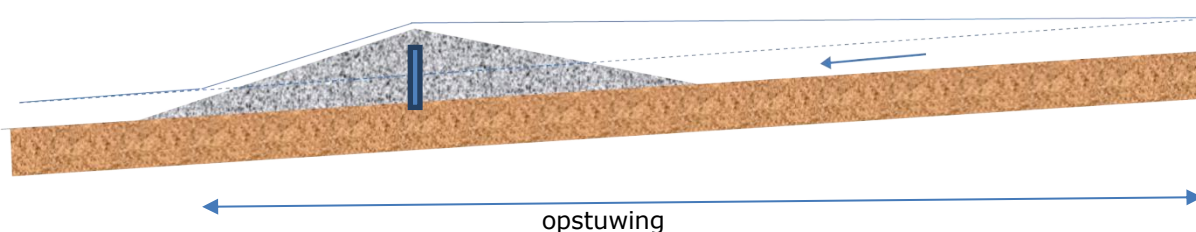
De oorzaken van de diepe grondwaterstanden zijn voornamelijk de hoogteligging en de bodemopbouw. Door de slecht doorlatende löss in de bovengrond in combinatie met de steile hellingen is infiltratie beperkt. Daarnaast hebben grote onttrekkingen voor drinkwaterwinning en talrijke kleine onttrekkingen voor beregening een niet te onderschatten invloed.

5. Resultaten experimenten

5.1 Grindsuppletie Keutelbeek

In de bedding van de Keutelbeek zijn minder bijzondere natuurwaarden en macrofaunasoorten aanwezig waardoor de maatregelen en experimenten ecologisch minder kritisch zijn. Bovendien vindt ook geen onderhoud plaats in het Kelmonderbos. Er wordt wel zeer frequent gewandeld door mensen, vaak met honden die ook in de beek komen. Ook zijn er frequent sporen van spelende kinderen aangetroffen.

De oevers van de Keutelbeek bestaan voornamelijk uit leem en löss en het beddingmateriaal uit een mengsel van onsamenhangend materiaal. Dit wijkt af van het grindrijke meer samenhangende materiaal in de Strabeker Vloedgraaf en dit vormde een belangrijk argument om in de Keutelbeek experimenten uit te voeren. In overleg met het deskundigenteam en het waterschap is gekozen voor een grindsuppletie.



Figuur 5.1. Schematische weergave grinddrempel

De monitoring is op dezelfde wijze uitgevoerd als in de Strabeker Vloedgraaf, met BACI-aanpak, met een meetpunt voor controle geheel bovenstrooms (KB3), een meetpunt bovenstrooms de grindsuppletie (KB6) en twee meetpunten benedenstrooms (KB5 en KB4). Bij het benedenstrooms gelegen meetpunt KB4 is ook een grindmatje toegepast om sediment te bemonsteren. Verder zijn bij alle meetpunten erosiebouten geplaatst om de erosie te meten. De locaties van de meetpunten en de maatregelen zijn aangegeven in figuur 5.2.

Op 6 maart 2020 heeft een inmeting van de beddingbodem plaats gevonden met een Total Station. De metingen daarvan zijn opgenomen in figuur 5.3.

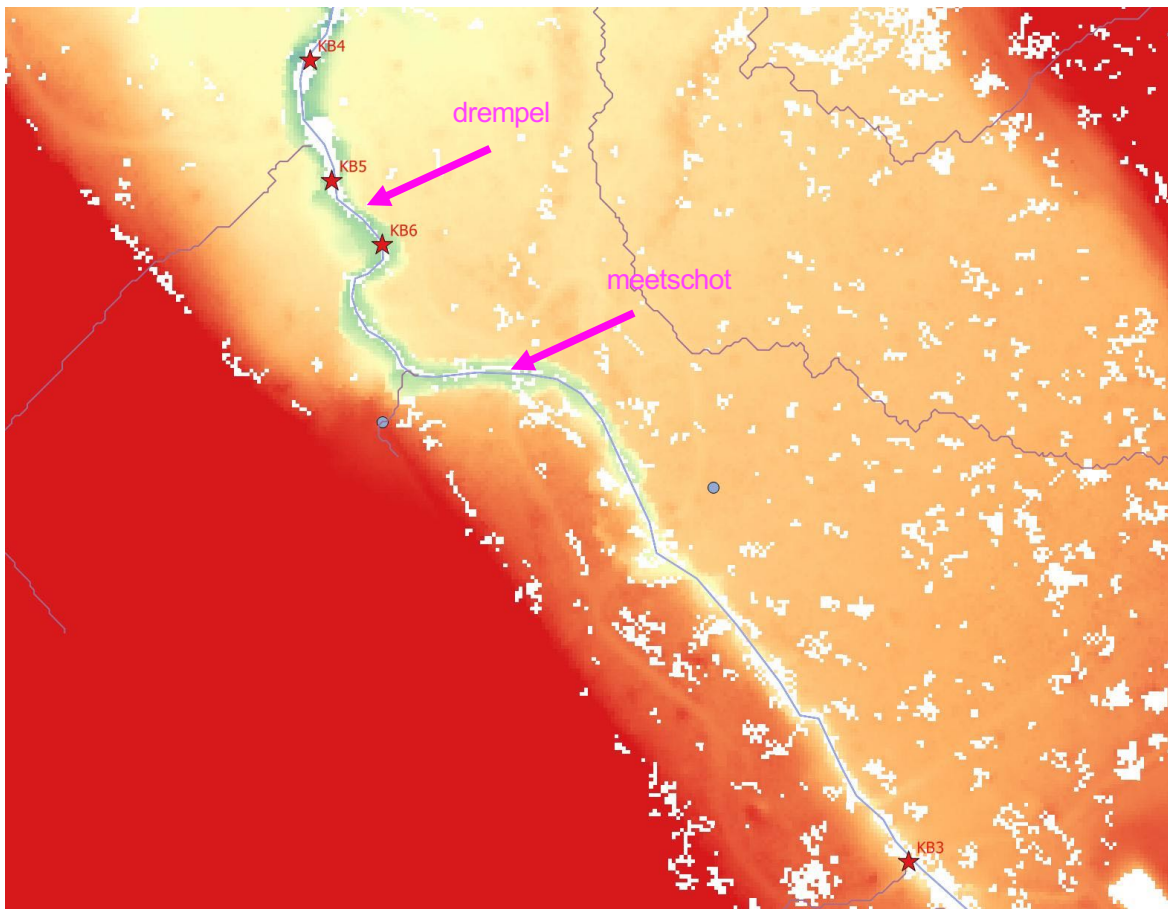
Op 23 maart 2020 is in het deel met de diepste insnijding, benedenstrooms meetpunt KB6 een grinddrempel met een hoogte van 20 cm hoog en een lengte van circa 5 m aangebracht. Hiervoor is 1.0 m³ schoon betongrind in de sortering 8-32 mm (in 2 gelijke delen 8-16 en 16-32), eerst grof en daarop fijn) gebruikt.

Er is over gedacht om in dit traject van de Keutelbeek een hogere drempel te realiseren of andere materialen toe te passen, maar vanwege het grote verschil in de samenstelling van de bodem en het beddingmateriaal is besloten om in eerste instantie juist een identieke maatregel uit te voeren als in de Strabeker Vloedgraaf zodat een goede vergelijking mogelijk is.

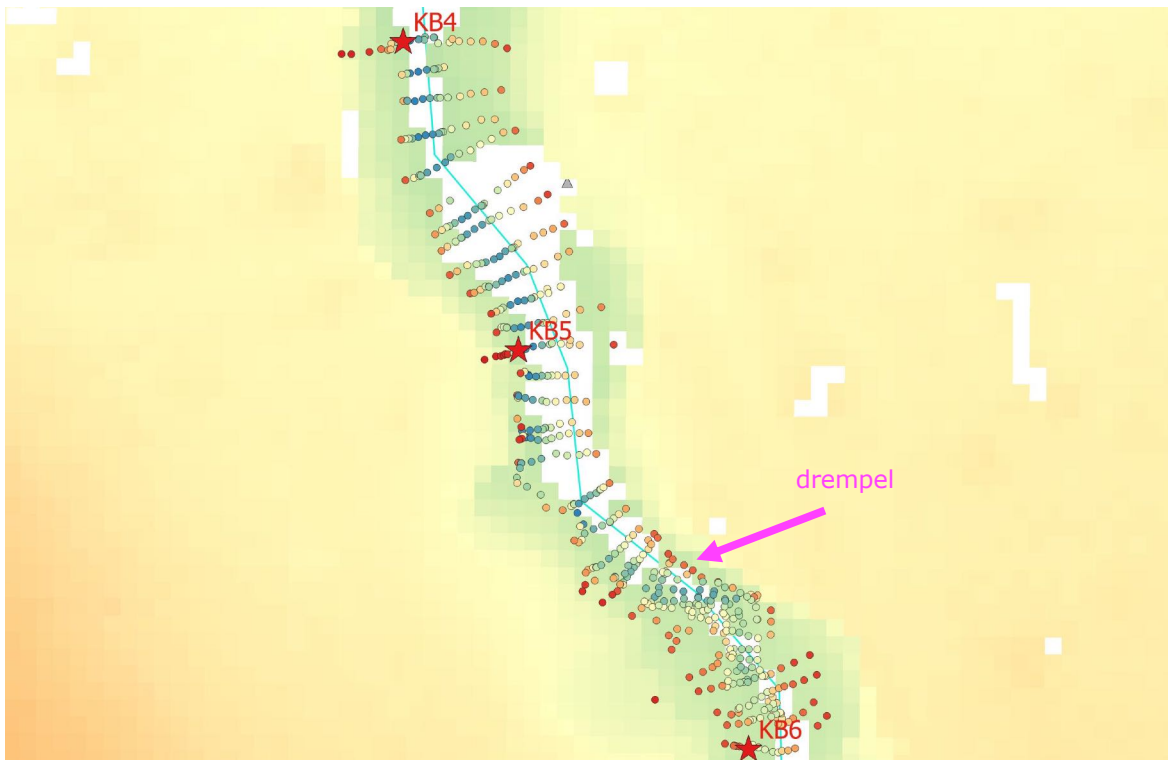
Bij de voorbereiding van de grindsuppletie is in eerste instantie getracht een Thomson meetschot te plaatsen om de debieten te meten. De steeds terugkerende onder- en achterloopsheid van het meetschot vanwege de slappe bodem maakte dat echter niet mogelijk, zonder zeer ingrijpende additionele maatregelen. Bovendien was er niet zoveel aanleiding om de debieten te gaan meten omdat gedurende de monitoring vooral sedimentatie was waargenomen en er door het waterschap werd geëxperimenteerd met de spindels en de vulling en leging van de buffer Kelmond.

Na de realisatie van de grinddrempel en de inmeting is de monitoring geïntensiveerd om de effecten van de grindsuppletie goed te kunnen evalueren. Daarbij zijn steeds veldverkenningen verricht waarbij de meetpunten zijn geïnspecteerd en schoongemaakt, de waterstanden ten opzichte van de loggers handmatig zijn gemeten, de erosiebouten zijn gemeten en de dataloggers zijn uitgelezen.

Vanwege de sedimentatie waren de erosiebouten bij de meetpunten en het grindmatje benedenstrooms echter vrijwel de gehele monitoringperiode niet zichtbaar.



Figuur 5.2. Experimentele traject met locaties meetpunten (controle KB3)



Figuur 5.3. Experimentele traject met locaties meetpunten en grindsuppletie Keutelbeek

Bovenstreams de grindsuppletie trad al spoedig veel afzetting van slib op, met veel platwormen. De gevarieerde substraat mozaïeken werden hierdoor bedekt. De grindsuppletie zelf was stabiel en vormde mogelijk nog een potentiële habitat voor stroomminnende soorten.



Voormalig meetpunt KB6 14-2-20



KB6 slibafzetting met platwormen 5-11-20

Omdat de grindsuppletie in de Keutelbeek stabiel bleef en in het onderzoekstraject weinig erosie was gemeten is in overleg met het deskundigenteam besloten de monitoring te beëindigen op 6 november 2020. Een belangrijk argument daarbij was dat daardoor meer dataloggers beschikbaar komen voor de Strabeker Vloedgraaf.



27-11-20



5-3-21



Stabiele grindsuppletie 29-4-21



Stabiel, drempel net zichtbaar 10-7-21

De intensieve monitoring met dataloggers heeft geleid tot voldoende peilmetingen waarmee goed inzicht in de afvoerdynamiek en de effecten van de suppletie is verkregen. Gebleken is dat het peil in de benedenstroomse meetpunten KB5 en KB4 geleidelijk daalt ten gevolge van erosie, met circa 5 cm in 1 jaar. Na de beëindiging van de monitoring met dataloggers is het traject nog wel enkele keren bezocht, met name na buien, de laatste keer was op 12 november 2021.

Pas op 10 juli 2021 is de houten drempel duidelijk zichtbaar geworden, hetgeen het gevolg was van de piekafvoer van 29 juni 2021. Toen is er een extreme bui waarbij het KNMI meetstation Maastricht 380 bij het vliegveld in het stroomgebied van de Keutelbeek een uursom van 67 mm neerslag heeft gemeten. Dit betrof een T=150 situatie. Helaas waren de meetpunten tijdens deze extreme situatie al niet meer actief. Uit mondelinge mededelingen van de inspecteur van het waterschap zijn er toen wel veel problemen geweest met de riolering, maar is het watersysteem van de Siepen- en Gijsbergervloedgraaf, de buffers en de beek in het Kelmonderbos niet overbelast.



Drempel zichtbaar 10-7-21



Erosie bij KB4 benedenstreams 10-7-21

Bij meetpunt KB4 geheel benedenstreams is duidelijk erosie opgetreden. Het matje en de erosiebouten zijn na lange tijd weer eens zichtbaar.



Drempel zichtbaar 12-11-21



Oevererosie door verplaatsing grind 12-11-21

Tijdens de piekafvoeren in de periode van 13 tot 16 juli 2021 is het water door het grind meer naar de oever gedwongen waardoor daar de oever is ondermijnd en bezwaken, zodat sterke oevererosie is opgetreden.

Uit de visuele waarnemingen, peilmetingen en de erosiebouten blijkt dat in de Keutelbeek:

- gedurende een groot deel van het jaar zeer geleidelijk transport van slib en ander fijn sediment optreedt, een deel daarvan betreft löss uit de bovenstrooms gelegen vloedgraven;
- waardoor sedimentatie overheerst en de beddingbodembodem voornamelijk bestaat uit fijn slib;
- erosie alleen zichtbaar is kort na piekafvoeren.

Resumerend

Uit het voorbeeld van de Keutelbeek blijkt dat het verval van de grindsuppletie en het erosieproces kan worden beperkt mits de piekafvoeren voldoende worden afgevlakt door bijvoorbeeld regenwaterbuffers. Deze regenwaterbuffers vormen echter nog niet de ultieme en duurzame oplossing, omdat de lozingen uit de buffers na piekafvoeren nog steeds voor een grotere hydraulische stress in de bedding zorgen en een te grote morfodynamiek. Er treedt dan langdurige afzetting van fijn organisch en mineraal slib op dat met piekafvoeren in pulsen wordt verplaatst. De buffers zorgen ervoor dat deze pulsen een kleinere amplitude hebben, maar ook een langere duur. Het positieve effect van het meer stabiele grind op de macrofauna is daardoor ook zeer beperkt. De morfodynamiek en de langere duur van de afgevlakte piekafvoeren leiden in de bedding nog steeds tot te veel accumulatie van fijn materiaal en niet tot de benodigde stabiliteit van de substraat- en habitatmozaïeken. Er is winst te behalen door te zorgen dat het regenwater minder snel via de vloedgraven naar de buffers stroomt, een groter deel van het gebufferde water infiltreert en het gebufferde water meer geleidelijk wordt geloosd door de ledigingsduur te verlengen.

5.2 Grindsuppletie Strabeker Vloedgraaf

In het geselecteerde onderzoekstraject in de Strabeker Vloedgraaf zijn in 2019 reeds 4 meetpunten geïnstalleerd. Tussen de meetpunten SV5 en SV6 is een grindsuppletie uitgevoerd in het diepst ingesneden deel van het traject. Dit is de meest kritieke locatie, zodat sprake is van een worst case. In dit deel van het traject ontstonden frequent obstructies door drijvende materialen die spontaan houtdammen vormden. Hierdoor werd de turbulentie groter waardoor er door erosie lokaal stroomkuilen konden ontstaan.



Figuur 5.4. Locatie Strabeker Vloedgraaf in detail

Op 23 maart 2020 is benedenstrooms meetpunt SV5 een grinddrempel met een hoogte van 20 cm hoog en een lengte van circa 5 m aangebracht. Hiervoor is 1.5 m³ schoon betongrind in de sortering 8-32 mm (in 2 gelijke delen 8-16 en 16-32), eerst fijn en daarop grof) gebruikt. Op 27 maart 2020 is de bedding en de grindsuppletie zo nauwkeurig mogelijk ingemeten met een Total Station om de grindsuppletie te monitoren.



Bovenaanzicht diepste insnijding met bladdam



Overzicht traject bovenstrooms

Benedenstrooms meetpunt SV4 is een Thomson meetschot geplaatst met een datalogger boven- en benedenstrooms om het debiet inclusief de verdrinkingsgraad te meten. Dit is afgewerkt met een laag keien en grind om uitspoeling van de oorspronkelijke bodem te voorkomen. De locatie is zo gekozen dat deze zo min mogelijk opvalt voor de wandelaars op het naastgelegen Pieterpad. Omdat na enige tijd achterloopsheid van het meetschot optrad is een staalplaat aangebracht door middel van intrillen, waaraan het meetschot is bevestigd. Daarnaast is rekening gehouden met de opstuwing bij piekafvoeren.



Grindsuppletie bovenstrooms 23-3-20



Grindsuppletie benedenstrooms

Door de eerdere waarnemingen van erosie bij geringe afvoeren en door het zichtbaar rollen van het grind bij het suppleren was de verwachting dat de grindsuppletie zich lang zou kunnen handhaven niet zo hoog. Toch bleef de grindsuppletie tot tenminste 28 april 2020 stabiel. Op die datum was er een flinke bui die heeft geleid tot afvoer uit de overstort van de Kleinhaasdalervloedgraaf en forse afstroming over de wegen en paden.

Op 4 juni 2020 waren er veel sporen aangetroffen van verstoring. De logger benedenstrooms het meetschot was weggehaald, de peilbuis was gevuld met klei en de tegels voor het breken van de overstortende straal waren weggehaald, met als gevolg een diep spoelgat (ca 20 cm). Het grind van de suppletie had zich verplaatst, het matje benedenstrooms was geheel overdekt met grind en de drempel was (5 cm) bloot komen te liggen. Het water stroomde langs de oostelijke oever waar veel wortels zitten. Er waren veel duidelijk zichtbare voetstappen in het afgezette fijne sediment aanwezig en er waren vers afgebroken takken.

Na de opname van de schade, de handmeting en het uitlezen van de loggers was de grindsuppletie handmatig hersteld.

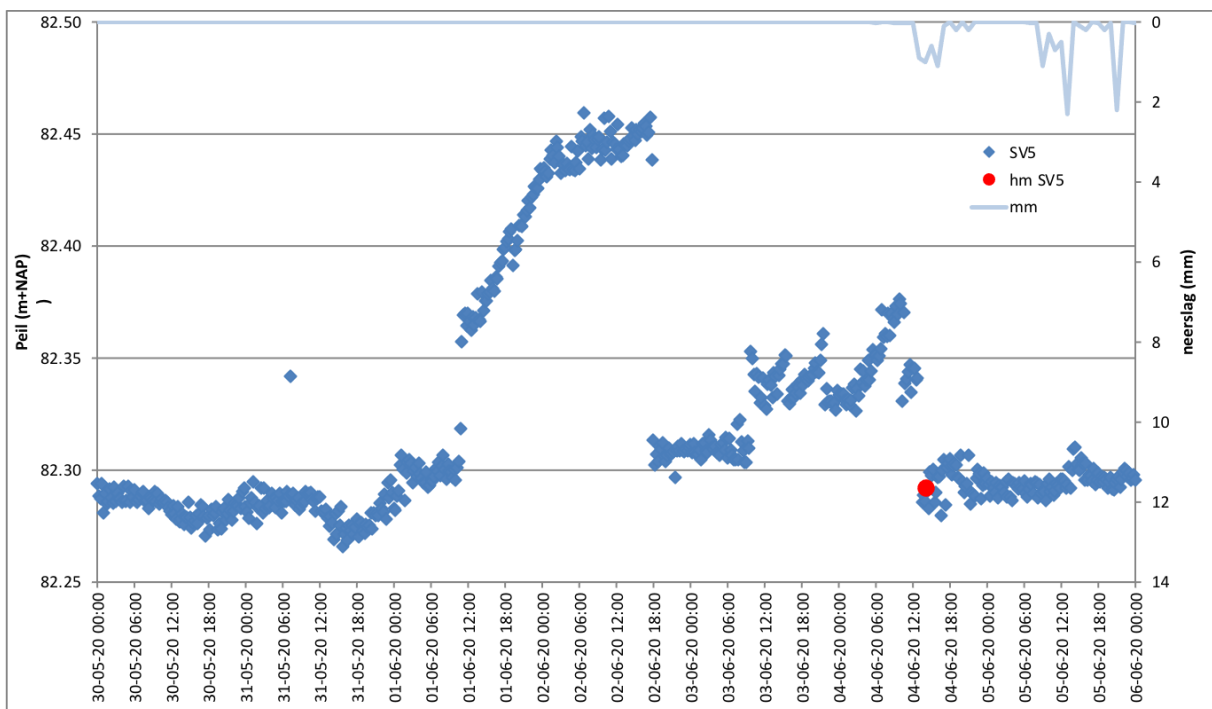


Vers afgebroken takken bij drempel 4-6-20



Vrij liggende drempel 4-6-20

Uit de peilmetingen van het bovenstrooms gelegen meetpunt SV5 bleek er een zeer opvallende geleidelijke stijging te zijn opgetreden op 1 juni 2020 tussen 8:30 en 17:30 uur, van meer dan 15 cm tijdens een langdurig droge periode. Een dergelijke stijging kan alleen gebeuren door drastische gebeurtenissen. De in het verleden waargenomen gebeurtenissen zoals grote houtblokken hebben nauwelijks geleid tot peilstijgingen. De grindsuppletie en de aanleg van de drempel met een hoogte van circa 20 cm heeft bij meetpunt SV5 geleid tot een peilstijging van slechts circa 10 cm. Gelet op de periode tussen 8:30 en 17:30 uur is het waarschijnlijk dat bij de grindsuppletie debietmetingen zijn verricht door derden.



Figuur 5.5. Peilstijging bij meetpunt SV5 tgv onbekende debietmeting derden

Vrijwel direct na het handmatige herstel van de grindsuppletie op 4 juni 2020 zijn er enkele buien geweest en is op 13 juni 2020 een flinke bui gevallen. Hierdoor was de drempel opnieuw 5 cm bloot komen te liggen bovenstrooms, en benedenstrooms is een spoelgat van bijna 20 cm ontstaan waardoor de drempel bijna onderloops was. Het grind heeft zich weer verder stroomafwaarts verplaatst, ook over het matje en tot ca 1 meter benedenstrooms daarvan. In het grind had zich bovenstrooms in het midden een geul gevormd en benedenstrooms hebben zich in het midden grindbanken gevormd die ertoe leiden dat het water langs de oevers stroomt. Na de opname van de schade, de handmeting en het uitlezen van de loggers is de grindsuppletie opnieuw handmatig hersteld.



Sporen betreding bij SV5 15-6-20



Drempel suppletie opnieuw zichtbaar 15-6-20

Op 17 juni 2020 treedt conform de weersverwachtingen een piekbui op en het is gelukt daarbij aanwezig te zijn zodat waarnemingen zijn gedaan van de effecten ter plekke en foto's en films zijn gemaakt. Daardoor is gezien hoe groot de afvoer en hoe de stroombeelden in het experimentele traject waren.



Meetstuw debietmeting 19:19



Meetstuw debietmeting 19:29

Na de overstortende straal bij de meetstuw handmatig te hebben gemeten is een veldverkenning verder bovenstrooms verricht om te zien waar het water vandaan kwam. Daaruit is gebleken dat er relatief weinig water afkomstig was uit de buffer Ravensbos en de Berkenhofbeek die wel over het Pieterpad stroomde door verstopping van de duiker.



Berkenhofbeek zijtak Carexweide 19:38



Veel afvoer via pad 19:38

Op basis van aanwijzingen van meerdere leden van het deskundigenteam dat de Berkenhofbeek veel water kon afvoeren is de situatie daar eerst bekeken. Daarbij bleek dat er weinig water uit de tak van de Carexweide stroomde, minder dan dat er over het pad afstroomde en dat ongeveer het dubbele door de hoofdtak werd afgevoerd.



Berkenhofbeek benedenstrooms 19:35



Benedenstrooms duiker VBK 19:54



Benedenstrooms brug 2 20:03



Bovenstrooms bij pad opsplitsend 20:12



Kleinhaasdalervloedgraaf bij duiker 20:15



Kleinhaasdalervloedgraaf over weiland 20:19

Uit de Vloedgraaf op de Voorste Brummenkuil stroomde veel water, maar duidelijk minder dan uit de duiker die is gelegen onder het Pieterpad, in de noordelijke tak van de Strabeker Vloedgraaf. Ook verder stroomopwaarts stroomde er nog vrijwel net zoveel water door het traject bij de 2^e brug en de grote keien dat daarvoor vrijwel altijd droog heeft gestaan. Verder bovenstrooms, waar ook de bodemval met het spoelgat zich bevindt is het water buiten de bedding getreden en naar het westen gestroomd. Nog verder bovenstrooms bij de monding van de Kleinhaasdalervloedgraaf en de tak van de buffer Billich bleek duidelijk dat vrijwel al het water uit de vloedgraaf afkomstig was. Toen was nog niet bekend dat daar een overstort aanwezig was.

Daarna is weer stroomafwaarts gelopen omdat het donker begon te worden. Bij de bovenstrooms gelegen vijver is om 20:56 op de V-vormige vaste drempel met een breedte van circa 3 m een overstortende straal van 7 cm gemeten. Met meer precieze gegevens van deze drempel kan mogelijk later nog een schatting van het debiet worden gemaakt.



Brug bij onderste vijver 20:47



Overlaat bij bovenste vijver 20:53



Afstroming over Pieterpad 21:03



Meetstuw achterloops 21:06



Stroming traject suppletie bij SV5 21:08



Buffer bovenstrooms bijna leeg 21:28

Opnieuw benedenstrooms gekomen (ca 21:00) was te zien dat de afvoer verder was toegenomen en dat het meetschot achterloops was geworden. Daarna is het meetschot verwijderd (ca 21:10) om verdere oevererosie te voorkomen. Op dat moment was de afvoer zo groot dat het rollen van stenen over de bodem duidelijk hoorbaar was. Tenslotte is geheel bovenstrooms de nieuwe buffer op het recent uitgebreide bedrijventerrein De Steeg in Klein Haasdal bezocht waarbij werd waargenomen dat het bovenste compartiment vrijwel

leeg was en het onderste slechts beperkt was gevuld. Daarna werd het te donker voor goede waarnemingen en foto's en na vertrek volgde de 2^e afvoerpiek om circa 22:30 uur.

De volgende ochtend zijn de effecten van de buien onderzocht. Direct bleek al duidelijk dat de grindsuppletie grotendeels was verplaatst en de drempels waren verdwenen, maar ook verder benedenstrooms was veel erosie opgetreden en overal waren grindbanken gevormd. Vrijwel alle hout is uit de beek verdwenen, deels afgezet op lage oevers maar vooral opgehoopt bij de palissade benedenstrooms waar het tot oevererosie heeft geleid.



Grindbank benedenstrooms onderzoekstraject



Grindbanken verder benedenstrooms



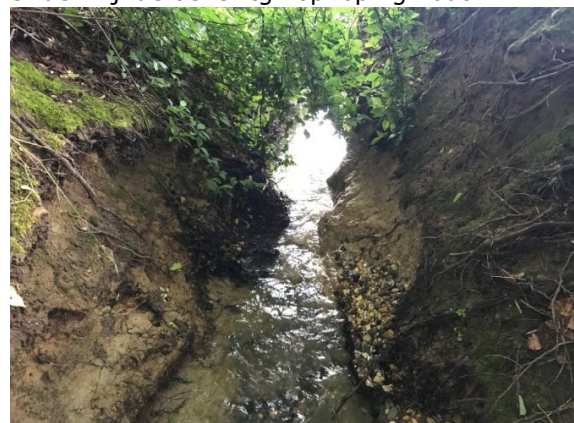
Stroming traject suppletie bij SV5 21:08



Ondermijnde oever tgv ophoping hout



Locatie van de drempel in centrum suppletie



Traject suppletie gezien vanaf bovenstrooms

In het traject waar de grindsuppletie, de drempels en de matjes waren was vrijwel geen grind meer aanwezig, slechts enkele grindbanken resteren. Daardoor is het meest nauwe deel van de bedding waarschijnlijk weer ongeveer op de oorspronkelijke diepte of dieper geworden. Dat het grind zich zou verplaatsen was voorzien, maar niet in dergelijke mate. De tijd voor stabilisatie van het grind

was ook wel erg kort door de recente verstoringen op 1 en 13 juni 2020. Daardoor is het de vraag of het experiment wel representatief is.



Keel waar drempels en matjes waren



Raaien SV5 bout B14 35 mm erosie bodemval

Onduidelijk is waar en of ook erosie van de oorspronkelijke bedding heeft plaats gevonden in het suppletietraject. Uit de erosiebouten is dat niet duidelijk af te leiden omdat een deel daarvan niet is waargenomen doordat ze bedekt waren geraakt met grind dat uit het bovenstroomse traject was aangevoerd. Maar uit de abrupte daling van de waterpeilen en de erosiebouten bovenstrooms de grindsuppletie bleek dat bij meetpunt SV5 net bovenstrooms de suppletie circa 35 mm erosie van de oorspronkelijke beekbodem is opgetreden.



Bovenkant suppletie bij kei en meetpunt SV5



Afzetting grind boven verwijderde meetstuw

Resumerend blijkt dat het effect van de grindsuppletie slechts van korte duur is geweest en de insnijding ter plaatse van de suppletie hooguit tijdelijk is gemitigeerd. Daarmee is vastgesteld dat de grindsuppletie in de Strabeker Vloedgraaf geen succesvolle maatregel is geweest.

5.3 Vervolg experimenten Strabeker Vloedgraaf

Na het verval van de grindsuppletie door de buien van 17 en 18 juni 2020 rees de vraag of en hoe de experimenten zouden worden vervolgd. In overleg met de opdrachtgever en het waterschap is toen besloten om de experimenten voort te zetten met de volgende provisorische maatregelen:

- plaatsing van 2 matjes ter plaatse van de voormalige drempel van de grindsuppletie, bovenstrooms en benedenstrooms de wortels, verankerd met een ijzeren haring en grondpennen;
- opvulling van het spoelgat benedenstrooms de meetstuw met stenen, een tegel en daarop een klein matje afgedekt met grind.



Matje 5 in keel vanaf boven gezien



Haring ter verankering bovenstrooms



Grondpen ter verankering benedenstrooms



Afwerking en markering grondpen

Het grotere matje 5 is geplaatst direct bovenstrooms de vernauwing (keel) waar eerst de drempel was. Het kleinere matje 6 is geplaatst net benedenstrooms het smalste deel van de keel. Beide matjes zijn verankerd met haringen en afgedekt met grind uit de grindbanken. Aan beide zijden van de matjes zijn erosiebouten aangebracht en grondpennen ter markering.



Afwerking en markering bout



Matje 6 afgedekt met grind grondpen

Op 16 juli 2020 is als aanvullend experiment een biologisch afbreekbaar worteldoek aangelegd in de keel benedenstrooms de matjes 5 en 6. Het worteldoek is vastgelegd met grondpennen en erosiebouten en daarna afgedekt met een laagje grind uit de grindbanken benedenstrooms.



Plaatsing worteldoek



Verankering met een erosiebout



Erosiebout naast worteldoek



Met grind afgewerkt worteldoek

Na de plaatsing van de matjes en het worteldoek zijn deze locaties intensief bestudeerd en zijn op basis van de waarnemingen steeds meer erosiebouten geplaatst die bij elke verkenning weer zijn opgemeten. In totaal zijn 53 erosiebouten aangebracht.

Op 29 januari 2021 is een nauwkeurige hoogtemeting van de bedding in het experimentele traject verricht met een Total Station. Tijdens deze meting was er een verhoogde afvoer en was het water erg turbulent en troebel. Er was weer een continue lozing van de Kleinhaasdalervloedgraaf. Uit de overige takken was ook enige afvoer, maar niet zoveel.



Benedenstrooms meetpunt SV7



Bovenstrooms meetpunt SV5



Houtdam in keel van boven



Houtdam in keel bij matje en worteldoek

De afvoer van de Vloedgraaf op de Voorste Brummenkuil was verhoogd en er was een beperkte afvoer uit de buffer Ravensbos. De duiker in de Strabeker Vloedgraaf onder het Pieterpad was enigszins gestremd en het water liep circa 100 m verder benedenstrooms over het pad waardoor het een bypass had gevormd.

De afvoer van de Berkenhofbeek was relatief gering. Bovenstrooms was de grindput volgelopen en er was een beperkte afvoer vanaf het bovenliggende terras. De zijtak bij de Carexweide had ook een geringe afvoer, die opvallend groter was dan bij de zomerse buien. Het water stroomopwaarts volgend leidde naar een bron juist ten oosten van de Carexweide. Blijkbaar is deze bron vooral actief na een langduriger periode van neerslag.



Duiker Berkenhofbeek



Duiker Carexweide



Spoelgat bij de bodemval (> 1.2 m)



Water gaat ondergronds onder keien stromen

Bovenstrooms bij de Kleinhaasdalervloedgraaf en benedenstrooms daarvan was wederom een forse afvoer. Het water stroomde zowel via de westtak bij de bodemval met het spoelgat als via de oosttak langs het pad ondergronds (!) onder de gestorte keien door. Hiervan zijn ook filmopnamen.

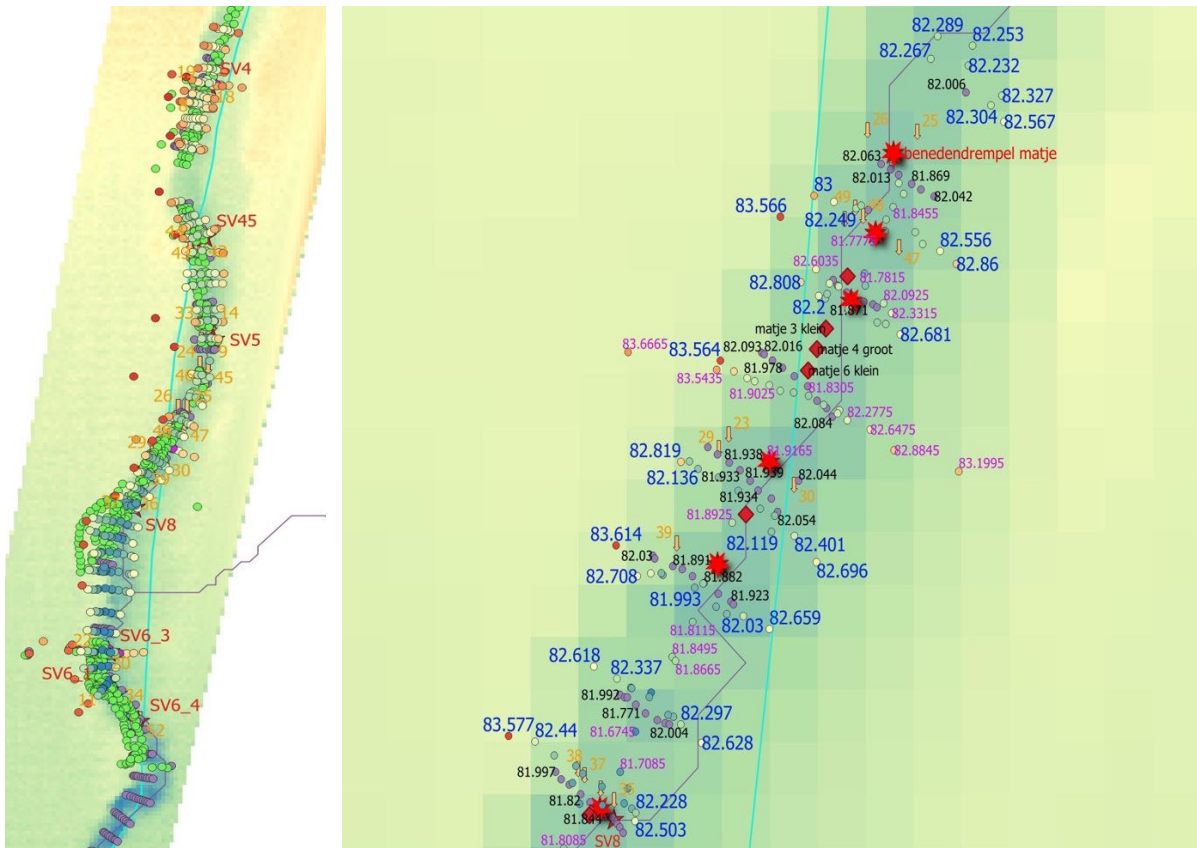


V-vormige drempel met lekkage



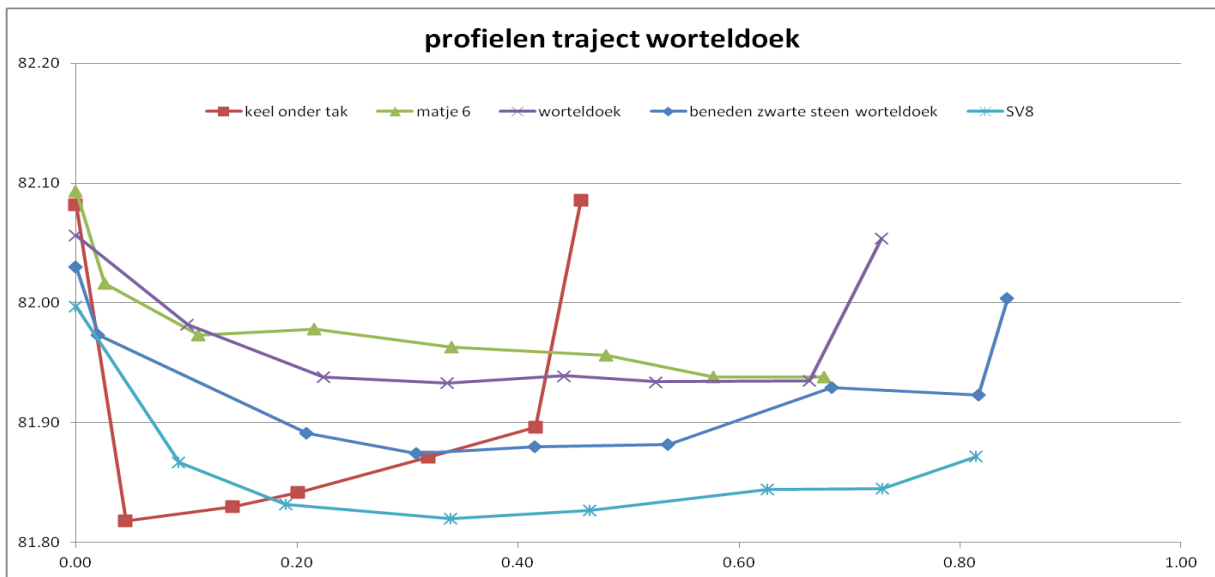
Benedenstreamse vijver

Uit de veldverkenningen, de metingen bij de erosiebouten en de hoogtemeting bleek dat de beddingbodern bij de matjes en het worteldoek zeer stabiel was. Er was een verbreding van het profiel gemeten en er trad wel erosie op aan de beide zijden van de matjes en het worteldoek, maar er was vrijwel geen verticale erosie gemeten.



Figuur 5.6. Impressie van de diverse hoogtemetingen met een Total Station

Uit de hoogtemeting is gebleken dat de bodemhoogte boven- en benedenstrooms het worteldoek lager is zodat het worteldoek als het ware een eiland vormt. Dit maakt het in principe kwetsbaarder voor erosie. Verder is ook gebleken dat het verhang over het worteldoek net zo groot is als of zelfs groter dan in andere delen van het onderzoekstraject.



Figuur 5.7. Dwarsprofielen traject worteldoek 29-1-2021

Na de laatste hoogtemeting van 29 januari 2021 is in overleg met de opdrachtgever besloten de monitoring te verlengen tot (na) de zomer, in afwachting van enkele meer extreme afvoeren. Deze zijn ook opgetreden op 4 maart 2021, 29 juni 2021 en uiteindelijk 14 juli 2021. Uit de vele waarnemingen tussen en na de meer extreme buien en de metingen volgde steeds hetzelfde beeld. De beddingbodemplaatjes en het worteldoek bleef nagenoeg stabiel ondanks dat aan de zijden en boven- en benedenstrooms erosie van de bedding was opgetreden. In onderstaande foto's wordt dit verduidelijkt.



Erosie 60 mm bij bout B33 in 1^e raai bij SV5



Erosie 37 mm bij bout B41 in 1^e raai bij SV5



Erosie aan zijde bij matje 5 beneden SV5



Stabiele bodemligging bij worteldoek

Na de enorme piekbui van 29 juni 2021 waarbij in Maastricht neerslag een zeer extreme uursom van 67 mm (T=150) is gemeten is het traject bezocht op 10 juli 2021. Ondanks sporen van forse oevererosie op veel plekken was er weer niet veel veranderd bij het worteldoek en matje 6. De matjes 4 en 5 waren wel bloot komen te liggen door erosie er omheen. De vrees was dat deze instabiel zouden worden.



Forse oevererosie en afzetting sediment



Gepolijste leem in talud 10-7-21



Worteldoek (rood) met bouten (paars) 10-7-21



Idem detail 10-7-21

Er waren veel plekken met ernstige oevererosie, met name aan de teen van het talud leidend tot gedeeltelijke ondermijning. Op andere plekken is het leem in de oever gepolijst. Het worteldoek was nauwelijks zichtbaar (rode pijlen) doordat het continu door sediment werd bedekt.



Matje 6 is nog steeds niet zichtbaar 10-7-21



Idem detail 10-7-21



Matje 5 is duidelijk zichtbaar en helt 10-7-21



Matje 4 bij staalplaat is blootgelegd 10-7-21

Op 13 juli 2021 zijn op basis van de weersverwachtingen waarbij 100 mm neerslag was voorspeld opnieuw extra dataloggers (terug)geplaatst om de effecten van de buien te meten. Daarbij is het meetinterval van deze extra loggers verkleind tot 5 minuten om ook de snelle pieken beter te kunnen meten. Tevens zijn ook handmatige profielmetingen verricht van de dwarsprofielen bij de meetpunten SV5 en SV6.3.



Meetpunt Kleinhaasdalervloedgraaf 13-7-21



Handmeting dwarsprofiel SV6.3 13-7-21

Op 16 juli 2021, na de calamiteiten is opnieuw een veldverkenning uitgevoerd om de effecten te meten van de langdurige periode met buien die helaas tot de ernstige overstrooming van de Geul in Valkenburg heeft geleid. Dit keer is bovenstrooms gestart.



Vrijwel droge buffer Billich 16-7-21



Vrijwel droge buffer Ravensbosch 16-7-21



Kleine buffer bedrijventerrein leeg 16-7-21



Grote buffer bedrijventerrein deels gevuld

Erg opvallend was dat de regenwaterbuffers vrijwel leeg waren en geen sporen van hoge waterstanden werden aangetroffen. Ondanks de langdurige en hevige neerslag is de oppervlakkige afstroming van de begroeide akkers blijkbaar toch beperkt gebleven en is daar dus toch een groot deel van de neerslag geïnfiltreerd. Mogelijk kunnen de metingen van de onderzoekers die in het kader van "Water in Balans" onderzoek aan de aardappeldrempels verrichtten hierin meer inzicht geven. Ook de gemeentelijke buffers op het bedrijventerrein De Steeg waren niet geheel gevuld. Dit wijkt af van de verwachtingen en strookt niet met de resultaten van de stresstesten.

Bij de familie Lemmens geheel bovenstrooms bij de overstort in de Kleihaasdalervloedgraaf en ook benedenstrooms was nog steeds oppervlakkig afstromend water met name over wegen en paden zichtbaar hoewel het al een tijdje droog was. De overstort op de Kleinhaasdalervloedgraaf was ook nog steeds actief.



Kleinhaasdaler Vloedgraaf nog lozend 16-7-21



Afstroming over pad benedenstrooms 16-7-21



Brandnetelobstructie benedenstrooms 16-7-21



Idem, met spoelgaten aan beide zijden



Loopverlegging benedenstrooms 16-7-21



Idem 16-7-21

Bovenstrooms, in het experimentele traject en verder benedenstrooms was sprake van een ravage die niet eerder was gesignaleerd. Ook de Berkenhofbeek deelde dit keer in de malaise, er was erg veel sediment afgezet. Toch was de afvoer op tijdens de veldverkenning weer beperkt, ongeveer net zoveel als dat er over de paden afstroomde.

Op diverse plekken in de Strabeker Vloedgraaf zijn de oevers ingestort of gepolijst en zijn grindbanken gevormd waarbij de loop zich wat heeft verlegd en ook grote stenen op de bodem zijn verplaatst. De wanden van de leemoevers zijn gepolijst tot een hoogte van ca 50 à 60 cm boven de bodem.



Gepolijste oever beneden SV6 16-7-21



Idem detail 16-7-21



Bij worteldoek verlegde stroomdraad 16-7-21



Worteldoek eiland brandnetel en grind 16-7-21



Spoelgat benedenstrooms matje 5 16-7-21



Natuurlijk herstel grind bij meetstuw 16-7-21

Bij matje 5 was benedenstrooms een bodemval (van ca 10 cm) ontstaan maar het matje heeft de afvoeren toch, beter dan verwacht, getrotseerd. Bij de meetstuw en matje 4 heeft de bedding zich weer autonoom gestabiliseerd door nieuwe afzetting van grind. Het is opvallend dat het matje daar stabiel blijft ondanks dat het was gelegd op de gedempte stroomkuil (van max 34 cm) die tijdens de piekafvoer van 17 juni 2020 was gevormd.

Ondanks de duidelijke erosie aan beide zijden van het worteldoek is het worteldoek zelf nog steeds stabiel gebleven. Hetzelfde gold voor matje 6 net bovenstrooms het worteldoek dat al lange tijd niet meer was waargenomen.

De kluiten met wortels van brandnetel die met de oevers in de beek waren gekomen zorgden voor verhoogde eilandjes en verlegging van de stroomdraad. Tussen meetpunten SV4 en SV5 heeft zich zo een meander gevormd en op het worteldoek heeft zich een eiland gevormd. Tijdens de extreme afvoeren van 14 juli 2021 was forse erosie opgetreden bij meetpunt SV5 dat zelfs geheel door het water was verwoest, waardoor de datalogger circa 25 meter was meegevoerd.



Meander door brandnetel en grind 16-7-21



Teruggevonden logger van SV5 16-7-21

De laatste veldverkenning heeft plaats gevonden op 12 november 2021, nadat er enkele kleinere buien waren geweest. Door de herfst waren er veel spontaan gevormde dammen van takken en blad in de beek aanwezig, ook in het onderzoekstraject.

Matje 5 was schuin komen te liggen doordat het benedenstrooms was ondermijnd door de bodemval, maar het matje is toch nog stabiel. Matje 4 en de gehele bedding bij de meetstuw was vrijwel ongewijzigd en nog steeds stabiel.

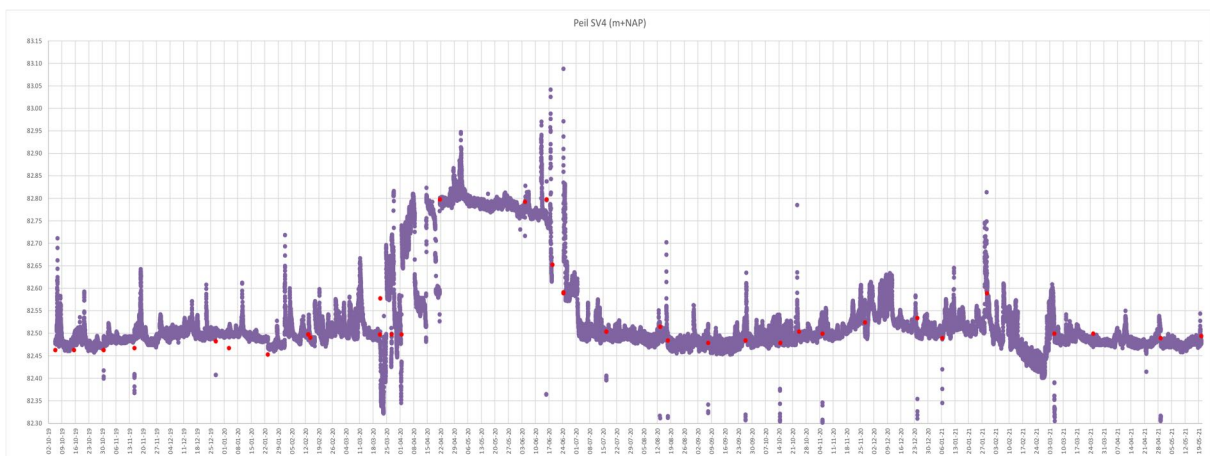
Het worteldoek was weer enigszins zichtbaar, mede doordat het restant van het eiland van brandnetelresten nog aanwezig was en de stroming aan de beide zijden ervan versterkte. Desondanks was het worteldoek zelf en de directe omgeving stabiel gebleven. Matje 6 net bovenstrooms het worteldoek was weer niet waargenomen.



Matje 5 in keel, schuin 12-11-21

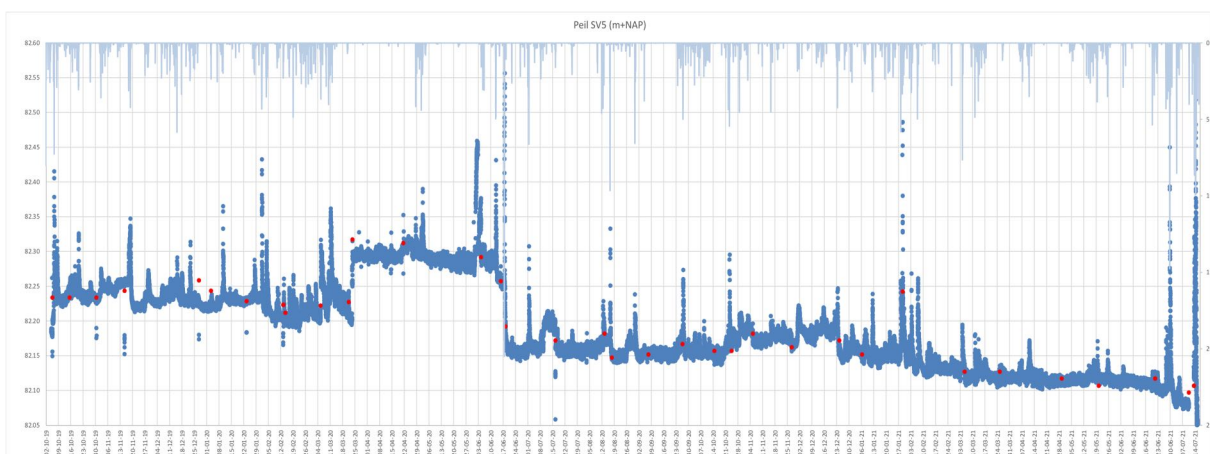


Worteldoek met rest eiland stabiel 12-11-21



Figuur 5.8. Gemeten waterpeilen bij meetpunt SV4 bovenstrooms meetstuw/staalplaat

Uit het stabiele peil en de stabiele bodemligging in meetpunt SV4 bovenstrooms de meetstuw en de staalplaat blijkt dat de combinatie van de staalplaat met het onderliggende matje bestand is tegen de reeks van piekafvoeren en erosie heeft weten te voorkomen.



Figuur 5.9. Gemeten waterpeilen bij meetpunt SV5 (bovenstrooms suppletie)

Uit de dalende trends in de peilen van meetpunten SV5 en SV6.3 die niet het gevolg zijn van een afname van de (basis)afvoer blijkt al de geleidelijke bodemdaling van circa 10 cm bij meetpunt SV5 en een veel geringere erosie van circa 5 cm bij meetpunt SV6.3. De mate van erosie bij meetpunt SV6.3 is overigens niet zo duidelijk doordat de erosiebouten vrijwel continu onzichtbaar waren. Desondanks wordt het beeld van de sterkere erosie bij meetpunt SV5 ook bevestigd door

de consistente waarnemingen bij de veldverkenningen, de hoogtemetingen met het Total Station, de handmetingen en de metingen met de erosiebouten.

dwarsprofiel	Uit TS/GPS 14-2-20 – 29-1-21	Uit handmeting bouten cumulatief
SV7 (controle)	ca 50 mm	ca 40 mm
SV4	geringe erosie 30 mm	afzetting grind daarna afname
SV5	50–100 mm erosie	50–100 mm erosie
bij worteldoek	ca 80 mm erosie (aan zijden)	ca 60 mm (aan zijden)
SV8	ca 50 mm erosie	ca 50 mm erosie
SV6.3	onduidelijke erosie	onduidelijke erosie, wijzigingen substraat
SV6.1	duidelijk sterk dynamisch	veel erosie bij erosiebout B11

Tabel 5.1. Samenvatting resultaten metingen erosie

Resumerend

Uit het totaal van de visuele waarnemingen, peilmetingen, erosiebouten en de hoogtemetingen blijkt dat de erosie vrij grillig verloopt. Ook bij lagere afvoeren treedt lokaal erosie op. Er is nog geen goede correlatie gevonden met de amplitude van de piekafvoeren maar er is wel een relatie met de langer durende hoge afvoeren. De totale arbeid of de totale sedimenttransportcapaciteit tijdens afvoerenpieken blijkt maatgevend te zijn. De statistische onderbouwing uit data-analyse is nog niet verkregen.

Zowel bij de matjes als het worteldoek is de beddingbodem stabiel gebleven terwijl elders ernstige erosie heeft plaats gevonden. De bedding lijkt zich door de beperking van de verticale erosie wel iets te hebben verbreed. Dit lijkt daar een direct gevolg van te zijn, maar hier kan de grillige oevererosie ook een rol in hebben gespeeld.

Het worteldoek is vooral effectief op vlakke stukken van de bedding, waar het als een pleister de onderliggende bodem kan afdekken en beschermen tegen erosie. Doordat het water er niet onder kan komen en het sediment zich er overheen verplaatst is het worteldoek zelf ook stabiel. Omdat gekozen is voor biologisch verantwoord en afbreekbaar materiaal zal het worteldoek op den duur wel in verval raken, maar dat is nog niet waargenomen.

Matjes zijn minder geschikt op vlakke stukken van de bedding omdat ze door de opstaande rand van ca 4 cm turbulentie veroorzaken en er vaak materiaal achter blijft hangen. Deze zijn daardoor meer geschikt om een vallende straal water op te vangen, bijvoorbeeld onder een vaste drempel.

Uit het onderzoek naar de bodemerosie is ook een betere indruk verkregen van de morfodynamiek en de invloed op de samenstelling van het beddingmateriaal. Evenals de configuratie van de substraatmozaïeken en de samenstelling van het beddingmateriaal verandert de diepte van kuilen steeds met de wisselende afvoeren ("ademt"). Op het hoogtepunt van de bodemschuifspanning tijdens piekafvoeren worden ook grote stenen, zoals de grove leistenen in de stroomkuil getransporteerd. Bij de kort daarna afnemende afvoer (falling limb) wordt er weer nieuw aangevoerd materiaal gedeponneerd. Ook de breedte varieert in reactie op de wisselende afvoeren, in een soort van regeneratie, zoals duidelijk is waargenomen bij de meetstuw.

Verder is uit de veldverkenningen, de watersysteemanalyse en uit de monitoring van de peilen en de morfologische veranderingen gebleken dat er relevante verschillen zijn tussen de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf.

In de Keutelbeek is het grootste deel van de tijd sedimentatie dominant waardoor vooral slib aanwezig is in de bedding. Het ontbreekt inderdaad aan voldoende gevarieerd substraat. De meeste harde substraten zijn resten van tegels en stenen, grind komt weinig voor. Er bevinden zich meerdere buffers en recent is direct bovenstrooms het onderzoekstraject een grotere buffer aangelegd die tijdens het onderzoek verder is geoptimaliseerd.

In de Strabeker Vloedgraaf bestaat de bedding voornamelijk uit een afwisseling van leem, grind en grotere stenen waarvan de substraatmozaïeken vrijwel continu enigszins veranderen, mede door het transport van grind, dood hout en blad. Er bevinden zich meerdere buffers en twee vijvers, maar deze liggen verder bovenstrooms en zijn daardoor niet zo direct invloed als in de Keutelbeek. Wel is pijnlijk duidelijk geworden hoe groot het negatieve effect is van de directe lozing van de overstort op de Kleinhaasdalervloedgraaf.

6. Synthese

6.1 Conclusies

In deze paragraaf zijn de belangrijkste conclusies opgenomen van het onderzoek naar oplossingen voor diepe insnijding van heuvellandbeken in Zuid-Limburg. Deze conclusies zijn gebaseerd op metingen van de waterpeilen en de bodemligging die gedurende twee jaar zijn verricht en op de experimentele effectgerichte maatregelen die zijn uitgevoerd en geëvalueerd. Er zijn enkele extreme piekafvoeren opgetreden, waarbij is gesignaleerd dat overstorten en lozingen veel frequenter optreden en intenser zijn dan gewenst is.

Resultaten van metingen en waarnemingen

Dit onderzoek heeft betrouwbare continue peilmetingen, debietmetingen en indicatieve metingen van erosie opgeleverd, waarmee de afvoerdynamiek en de morfologische effecten goed zijn geanalyseerd. Doordat ook met succes waarnemingen zijn gedaan van de extreme buien op 17 juni 2020 en 14 juli 2021 is duidelijk geworden welke routes het water volgt en wat de belangrijkste oorzaken zijn. Dat zijn bij deze beken de overstorten en lozingen van het stedelijk gebied op de hoger gelegen plateau's die veel vaker (meerdere keren in een jaar) en veel intensiever optreden dan werd verwacht en beleidsmatig is toegestaan. Deze zorgen voor steeds toenemende hydraulische stress en morfodynamiek waardoor de levensgemeenschappen in en langs de beek ernstig worden bedreigd. Daarnaast leiden de overstorten voor grote snelle temperatuurschommelingen die schadelijk kunnen zijn voor waterorganismen, zeker nabij de monding van bronbeekjes.

Bovendien leveren de piekafvoeren met kortdurende peilstijgingen naast diepe insnijding ook destabilisatie en verstoring op van de langs de beken gelegen brongebieden en op termijn verruiging en verontreiniging.

De afstroming vanuit het landelijk gebied speelt bij de Strabeker Vloedgraaf een minder grote rol, bij de fluviatiele erosie en de insnijding. Bij oppervlakkige erosie zoals ook op de plateauranden van de Strabeker Vloedgraaf is waargenomen en bij andere beken kan dat anders liggen. Het benadrukt de noodzaak altijd een goede watersysteemanalyse uit te voeren.

Uit de combinatie van continue peilmetingen, debietmetingen, metingen van bodempeilen, visuele waarnemingen en een eigen globaal model is een goed beeld verkregen van de relaties tussen afvoeren in het watersysteem van de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf en de erosie.

Op basis van de waarnemingen, de monitoring en de uitgevoerde experimenten kan worden geconcludeerd dat:

- In alle onderzochte trajecten een geleidelijke daling van de beddingbodem en dus erosie optreedt, in de Keutelbeek minder dan in de Strabeker Vloedgraaf;
- Erosie vindt niet alleen plaats bij hoge piekafvoeren maar ook bij lagere afvoeren, niet de absolute amplitude van de debieten, maar de combinatie van amplitude, duur en frequentie (samen de arbeid of hydraulische belasting) en de timing zijn bepalend voor de mate van erosie;
- Locatiespecifieke factoren zoals spontaan gevormde houtdammen en oevererosie kunnen leiden tot zeer dynamische processen die moeilijk te doorgronden zijn;
- De eigenschappen van löss, leem en met name colluvium variëren ruimtelijk sterk, op sommige plekken is het materiaal erg erosiebestendig en op andere plekken treedt snel achter- en onderloopsheid op, dit is onafhankelijk van het waterpeil en de druk, de oevererosie wordt versterkt door vorst;
- Door de klimaatverandering met grotere extremen en uitbreiding van verharde oppervlakken zal de insnijding versnellen.

Effectgerichte maatregelen

De grindsuppletie in de Keutelbeek is vrij succesvol geweest, maar niet in de Strabeker Vloedgraaf. De grindmatjes en het worteldoek in de Strabeker Vloedgraaf hebben goed gefunctioneerd en hebben de extremen afvoerpieken van 29 juni 2021 en 14 juli 2021 doorstaan. Deze maatregelen verdienen verdere toepassing in vergelijkbare beken in het heuvelland. De erosie is met succes vertraagd, maar effectgerichte maatregelen vormen geen duurzame oplossingen. Daartoe zijn met spoed meer brongerichte maatregelen noodzakelijk.

Verder is uit de veldverkenningen, de watersysteemanalyse en uit de monitoring van de peilen en de morfologische veranderingen gebleken dat er relevante verschillen zijn tussen de Keutelbeek en

de Strabeker Vloedgraaf. In de eerste plaats zijn dat de ligging van de buffers in relatie tot de overstorten. Bij de Keutelbeek vindt de grootste lozing van het verharde oppervlak van het plateau plaats via een grote buffer die vervolgens weer via een vloedgraaf in een andere buffer uitmondt. Bij de Kleinhaasdalervloedgraaf die uitmondt in de Strabeker Vloedgraaf vindt op het plateau een lozing plaats zonder randvoorziening of buffer.

In de Keutelbeek is het grootste deel van de tijd sedimentatie dominant waardoor vooral slib aanwezig is in de bedding en het ontbreekt daardoor aan voldoende gevarieerd substraat. De meeste harde substraten zijn resten van tegels en stenen, grind komt weinig voor. Er bevinden zich meerdere buffers en recent is direct bovenstrooms het onderzoekstraject een grotere buffer aangelegd die tijdens het onderzoek verder is geoptimaliseerd.

In de Strabeker Vloedgraaf bestaat de bedding voornamelijk uit een afwisseling van leem, grind en grotere stenen waarvan de substraatmozaïeken vrijwel continu enigszins veranderen, mede door het transport van grind, dood hout en blad. Er bevinden zich meerdere buffers en twee vijvers, maar deze liggen verder bovenstrooms en hebben daardoor niet zoveel directe invloed als in de Keutelbeek.

Optimalisatie van buffers kan ook een effectgerichte maatregel zijn, maar ook dat dient per geval met zorg te worden onderzocht. Gebleken is dat langduriger gematigde afvoeren ook veel erosie kunnen veroorzaken en daardoor is het niet voldoende afvlakken van piekafvoeren minder effectief en mogelijk zelfs contraproductief.

Duurzame oplossingen

Feitelijk kunnen alleen bronmaatregelen duurzame oplossingen bieden, hiermee kan onder andere worden bereikt:

- minder afvoer, minder langduriger pieken van overstorten;
- door meer te infiltreren en te bergen, zoals verwerking van hemelwater op eigen terrein;
- vang waar mogelijk water op in bestrating, tussen drempels, leg dorpels in goten;
- leidt onvermijdelijke lozingen (via leidingen) naar vlakkere plekken verder benedenstrooms.

Minder afvoer en minder langduriger pieken van overstorten zijn in principe mogelijk. Mogelijk vergt dit een herziening van het beleid van het waterschap rondom de leegloop en sturing van de buffers. In ieder geval lijkt het noodzakelijk om de afvoeren uit overstorten nog veel verder te reduceren dan voorgeschreven in het huidige beleid (maximaal 1 overstort per 5 jaar). Dit vergt geen lange voorbereiding, er kan direct kleinschalig mee worden begonnen, in eerste instantie bij nieuwe ontwikkelingen en bij overheidsprojecten (voorbeeldfunctie).

Ecologische effecten

Omdat diepe insnijding grote invloed kan uitoefenen op de karakteristieke levensgemeenschappen van de beekdalen worden de ecologische effecten hier kort benoemd. Onderscheid wordt gemaakt tussen effecten op de aquatische levensgemeenschappen binnen de beekbedding en effecten op nabijgelegen natte (terrestrische) natuurwaarden. Hierbij ontbrak het aan recente gegevens omdat geen ecologische monitoring door het waterschap heeft kunnen plaats vinden.

Voor de levensgemeenschappen in de bedding zijn alle milieufactoren of sleutelfactoren, zoals: temperatuur, zuurstof, zuurgraad, stroming en substraat (beddingmateriaal) van belang. Dit laatste is sterk variërend zowel ruimtelijk als temporeel en misschien wel het grootste verschil tussen de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf. Bij de Keutelbeek is er wel voeding van koel bronwater maar bestaat het beddingmateriaal voornamelijk uit fijn, los substraat terwijl het in de Strabeker Vloedgraaf om een mengsel van grof grind betreft dat veel stabiel is. Maar ook daar treedt veel transport op van zelfs de grofste fracties, stenen van meerdere kilo's.

De typische macrofauna van heuvellandbekken heeft een continue, weinig variërende afvoer van koud schoon water nodig over (en) een gevarieerd stabiel substraat. Door de overstorten is dit water regelmatig warm, vuil en is de gehele bedding voortdurend in beweging. Daarbij treedt niet alleen drift en begraving op, maar wordt ook de gehele habitat getransporteerd.

Voor de effecten op de aquatische levensgemeenschappen geldt:

- Door de huidige hydraulische belasting en erosie in de Strabeker Vloedgraaf en ook in de minder sterk belaste Keutelbeek is zeer beperkte stabiliteit van het beddingmateriaal en variatie in substraat aanwezig;
- Omdat de overstorten ook al werken bij geringe neerslaghoeveelheden treden frequent en vaak langdurig zeer ongunstige omstandigheden (hydraulische belastingen) op;
- Voor het behoud en een goede ontwikkeling van de levensgemeenschappen in en rondom de beek zouden de lozingen en overstorten drastisch dienen te worden gereduceerd, nog meer dan met het huidige beleid wordt nagestreefd.

Bronbeek organismen zijn afhankelijk van een constante stroom aan koud schoon water over een mozaïek aan substraten met een goed ontwikkelde hyporheïsche zone. Piekafvoeren en erosie tasten dit leefgebied aan, veel soorten zullen daardoor verdwijnen.

Voor de effecten van diepe insnijdingen op de nabijgelegen natuurgebieden geldt:

- Dat deze sterk afhankelijk zijn van de relaties tussen het grondwater en de waterpeilen in de beek, die hoofdzakelijk worden bepaald door de hoogteligging, vegetatie, doorlatendheid en de bodemopbouw;
- Dat de waterstanden in het experimentele traject in de Strabeker Vloedgraaf continu hoger zijn dan de grondwaterstanden dicht bij de insteek, de beek werkt daar dus niet drainerend en heeft geen (negatieve) invloed op het grondwater;
- Alleen als het grondwater de beek ook kan bereiken is er mogelijk sprake van significante invloed, in dat geval zou de basisafvoer ook groter zijn dan de gemeten 5 à 15 l/s;
- De basisafvoer van de Strabeker Vloedgraaf en de Keutelbeek is waarschijnlijk vrijwel geheel afkomstig uit de diverse bronnen die via oppervlakkige afstroming op de beek uitmonden.

6.2 Aanbevelingen

Zeer nadrukkelijk is gebleken dat inzicht in het functioneren van het watersysteem essentieel is om effectieve maatregelen te vinden en dat daarvoor maatwerk nodig is. Een monitoringonderzoek en een watersysteemanalyse kunnen daarbij van grote waarde zijn. Deze investeringen verdienen zich snel terug. Zoals uit dit onderzoek is gebleken zijn de oorzaken van de erosie en de invloed van overstorten wel eens anders dan aanvankelijk werd gedacht.

Omdat overstorten en lozingen de voornaamste oorzaken van erosie zijn is nauwe samenwerking met gemeenten noodzakelijk. Naast de amplitude van het debiet zijn de duur, de frequentie en timing van de overstorten bepalende factoren. Deze zijn vooral afhankelijk van de sturing van rioolgemalen en de optimale benutting van de berging in het rioolstelsel. Aanbevolen wordt om samen met de gemeenten de functionaliteit van de riolering en overstorte te beoordelen. Dan kunnen direct onterecht afgezaagde regenpijpen weer op de riolering worden aangesloten.

De positieve ervaringen met de grindmatjes en het worteldoek als effectgerichte maatregelen geven voldoende aanleiding voor toepassing in andere trajecten met duidelijk ongewenste beddingerosie. Hoe duurzaam ze zijn moet nog blijken, maar ze zijn eenvoudig en voordelig te herstellen en/of uit te breiden. Maar het zijn slechts pleisters op de diepste wonden. Echt duurzame oplossingen moeten komen van grootschalige brongerichte maatregelen waarbij de nadruk moet liggen op het herstel van de natuurlijke hydrologie, infiltratie in de bodem en de reductie van (grondwater)onttrekkingen. Overwogen kan worden om op grote schaal regenwater op te vangen (voor hergebruik) en infiltratievoorzieningen aan te leggen (onder grote verharde oppervlakken). Ook is het raadzaam te controleren of de normen zoals 80 mm berging op eigen erf ook in de praktijk worden gerealiseerd. Maar zelfs dat kan niet voorkomen dat extreme (langdurige) buien problemen en wateroverlast optreden. De voorspelde klimaatveranderingen maken de kans daarop nog groter en dit bevestigt nogmaals de noodzaak van goede watersysteemanalyses.

Voorgesteld wordt om de experimenten ook de komende jaren extensief te blijven monitoren en aanvullend monitoring van de overstorten en regenwaterbuffers te (laten) verrichten.

Voor zeer urgente situaties waarvoor op korte termijn tijdelijke mitigatie de enige mogelijk is kan worden gewerkt met (combinaties van):

- lage drempels (met woelbakken);
- grindmatjes;
- worteldoek.

Dit zal vrijwel altijd maatwerk vergen omdat de effectiviteit afhankelijk is van de locatiespecifieke factoren zoals o.a. reeds veroorzaakte instabiliteit, bodemopbouw, kweldruk, beddinggeometrie.

De effectiviteit van bestaande en geplande regenwaterbuffers kan relatief eenvoudig worden onderzocht en geoptimaliseerd. Daar is in sommige situaties veel winst te behalen, maar daarbij moet misschien wel worden overwogen de eis dat de buffer binnen 24 uur leeg dient te zijn los te laten. Bij sommige buffers wordt zelfs een kortere tijdsduur gehanteerd. Als de buffers langzamer leeg mogen lopen kan de hydraulische belasting verder worden gereduceerd.

Door aansluiting op het programma voor klimaatadaptatie en mitigatie komen brongerichte maatregelen mogelijk eerder binnen bereik. Op korte termijn kan in ieder geval integrale hydrologische, morfologische en ecologische monitoring (systeemmonitoring) binnen bereik komen.

De opgedane kennis en inzichten kunnen mogelijk direct worden gebruikt ten behoeve van de evaluatie van de overstromingen van de Geul en beheerplannen zoals voor het Geuldal. Aanbevolen wordt om goed in beeld te brengen hoe groot de hydraulische belasting (afvoerdynamiek) van de beken en waterlopen is en wordt.

Er is getracht een SOBEK-model op te stellen met meerdere neerslag-afvoer knopen maar dat is in verband met de tijd niet voltooid. Een dergelijk model kan beter inzicht geven in de diverse bronnen van het water dat bij diverse buien wordt afgevoerd. Dit is waarschijnlijk zeer sterk afhankelijk van de terreinhellingen omdat de mate van infiltratie op steile hellingen zonder begroeiing zeer beperkt zal zijn ten opzichte van de oppervlakkige afstroming.

Met de verkregen meetgegevens kan veel meer worden gedaan dan in het kader van dit onderzoek en deze rapportage gewent was en verdient nadere verdieping en analyse. Mogelijke toepassingen kunnen bijvoorbeeld zijn:

- kwantitatieve analyses van omstandigheden tijdens extreme neerslag, bv hoe lang duurt het voordat de neerslag tot afvoer via de overstort komt en het waterpeil in de beek maximaal is?;
- planvorming en validatie van maatregelen ten behoeve van klimaatadaptatie, bv waar kunnen buffers optimaal functioneren en hoeveel effect heeft dat op de afvoeren in de beek?;
- validatie en kalibratie van hydraulische en morfologische modellen.

6.3 Antwoorden op de kennisvragen

Het onderzoek heeft meer en diepgaander inzicht opgeleverd in het functioneren van de watersystemen van heuvellandbeken en de daarmee samenhangende erosie die tot diepe insnijdingen kan leiden. Deze inzichten zijn gebruikt voor de formulering van de antwoorden op de kennisvragen uit paragraaf 1.2.

Welke ervaringen zijn elders (in praktijk vooral in naburig buitenland) al opgedaan met het herstel van snelstromende, te diep ingesneden beken? En bieden deze ervaringen perspectief op een duurzaam herstel van de bronbekecosystemen in het Heuvelland?

In Duitsland en in België is enige ervaring. Ook in de VS en het Verenigd Koninkrijk is enige ervaring die bruikbaar zou kunnen zijn. Het ontsluiten van al dan niet succesvolle ervaringen is zeer moeilijk gebleken, zeker als ook moet worden voldaan aan criteria zoals representativiteit en wetenschappelijke onderbouwing. Uiteindelijk is gebleken dat ervaringen niet goed konden worden gebruikt voor dit onderzoek vanwege de beperkte gegevens die beschikbaar waren, de verschillen in het reliëf en de bodemopbouw en de beperkte tijd.

Van de eerder uitgevoerde experimenten in de regio zijn op diverse locaties wel sporen gevonden, maar deze zijn onvoldoende gedocumenteerd om een bijdrage te kunnen leveren. Een positieve uitzondering vormen de experimenten in de Noor (Campuzano, 2017), maar de Noor maakte slechts bij de quickscan onderdeel uit van het onderzoek.

Het experiment in de Noor met de inbreng van bomen en houtpakketten in 2016 heeft niet het gewenste resultaat gehad en heeft zelfs geleid tot versnelde erosie. Het meest recente lopende experiment met houtpakketten en grindsuppletie lijkt een verbetering, maar heeft vermoedelijk ook nog niet geleid tot een standstill of herstel. Het lijkt erop dat de houtpakketten een te grote turbulentie veroorzaken en de erosie onder en naast de houtpakketten doorgaat waardoor de grindbedden toch achterloops raken.

ViForis heeft in het kader van het anti-verdrogingsprogramma voor Waterschap Limburg in 2016 het ontwerp en de uitvoering van de Hulsbergerbeek begeleid. Maatregelen bestonden uit een combinatie van de verhoging van de beekbodem, verlegging van de beekloop en plaatselijke verlaging van het maaiveld in het beekdal. Dit lijkt goed te hebben gewerkt tegen erosie, maar ook daarvan zijn uiteindelijk te weinig gegevens beschikbaar om een goede kwantitatieve evaluatie uit te voeren. Voor de macrofauna heeft het nog geen positieve effecten gehad.

Met welke effectgerichte (herstel)maatregelen valt de negatieve invloed van een onnatuurlijke insnijding te herstellen?

- a) Welke maatregelen worden in de Zuid-Limburgse stroomgebieden reeds genomen om de oorzaken van te diepe insnijding te voorkomen? Zijn deze maatregelen afdoende (stand stil) of zijn er andere of aanvullende maatregelen noodzakelijk? Ligt er een goede systeemanalyse aan ten grondslag?
- b) Wat zijn kansrijke maatregelen voor het herstel en hoe zijn die te vertalen naar snelstromende, diep ingesneden beken zoals aanwezig in de Zuid-Limburgse situatie? Zijn andere aanvullende maatregelen voor herstel te bedenken?
- c) Wat is de toepasbaarheid, effectiviteit en duurzaamheid van deze maatregelen, zowel rekening houdend met de aan grondwater gebonden habitattypen in de directe omgeving als aan de beekgemeenschappen. Onder welke voorwaarden zijn deze maatregelen toepasbaar?

Echt kansrijke maatregelen die toepasbaar, effectief en duurzaam zijn, zijn maatregelen die zijn gericht op het wegnemen van de oorzaken van diepe insnijding. Dit zijn de verandering van het grondgebruik en de daarmee samenhangende afname van de infiltratie en de toename van de snelle oppervlakkige afstroming van neerslag. De meest effectieve en duurzaamste oplossingen liggen dus niet in de beekbedding maar in het stroomgebied. Dit vergt brongerichte maatregelen die grootschalig dienen te worden toegepast en dat vergt veel tijd. Daarom wordt ondertussen getracht om de diepe insnijding tegen te gaan met effectgerichte maatregelen.

De mogelijkheden van brongerichte maatregelen zoals vergroting van de berging en infiltratie bij de bron zijn zeer recent door het waterschap onderzocht in het programma Water in balans. Hiertoe zijn uitgebreide hydraulische modelberekeningen verricht waaruit de effectiviteit van eerder uitgevoerde maatregelen, zoals buffers kan worden afgeleid en kan worden bepaald welke aanvullende maatregelen verder kunnen worden genomen. Hierbij moet vooral worden gedacht aan maatregelen in de riolering en de waterafvoer.

Daarnaast kan afstromend hemelwater worden vertraagd en worden benut met kleinschalige maatregelen, denk o.a. aan acties zoals regentonnen, vegetatiedaken en stoeptegeltax. De effecten van de huidige brongerichte maatregelen wegen waarschijnlijk echter nog niet op tegen de toename van het verharde oppervlak. Uit enkele recente vergunningen en watertoetsen in het beheersgebied van het waterschap is gebleken dat de hoge afvoeren per saldo nog altijd toenemen, zeker bij extreme pieken. Mogelijk is het afkoppelen (van het riool) en oppervlakkig afvoeren van hemelwater hier mede debet aan, omdat het water daardoor nog sneller benedenstrooms terecht komt en minder infiltreert.

Herstellen van reeds geërodeerde delen van de bedding is alleen mogelijk met maatwerk en zeer zorgvuldig uitgevoerde combinaties van technische maatregelen. Het omleiden van de afvoerpieken via een bypass of een gesloten buis of het aanvullen van de erosiekuilen met erosiebestendig natuurlijk materiaal zoals platte stenen is waarschijnlijk het meest effectief. Knelpunt is dat overkluizingen onlangs juist vaak (terecht) zijn verwijderd in het kader van beekherstel en dit soort maatregelen een negatief ecologisch effect kunnen hebben.

Met dood hout pakketten en grindsuppletie alleen zal het waarschijnlijk niet lukken om het materiaal vast te leggen en consolidatie duurzaam te laten plaatsvinden. Indien het al lukt zal dit tijdelijk zijn omdat het hout op kortere termijn vergaat dan dat nodig is om het sediment te laten stabiliseren en consolideren, hetgeen vele decennia vergt. Bovendien blijven daardoor stroomversnellingen optreden die bij piekafvoeren leiden tot erosie benedenstrooms de "constructies". De reeds relatief erosiebestendige bedding van de Noor is immers ook al ten prooi gevallen aan erosie volgens het onderzoek van Dijksma (1998) en Valk (2016). De nieuw gevormde delen van de bedding zijn en blijven zeer langdurig erg gevoelig voor erosie. Duurzame sedimentatie in de bestaande bedding is waarschijnlijk alleen te realiseren door ter plaatse van de erosie een grote buffer met knijpconstructie te maken, die geleidelijk kan sedimenteren. Alleen zal dit door de ingreep zelf en door de frequente inundatie grote negatieve invloed hebben op de nabijgelegen natuurwaarden zoals de kalktufbronnen. Een alternatief zou nog kunnen zijn om de erosiegaten op te vullen met platte natuurstenen indien die in de omgeving voorkomen. Daarbij is het noodzakelijk om turbulentie te vermijden omdat anders erosie benedenstrooms plaats zal vinden.

Een andere effectgerichte maatregel is misschien mogelijk door de vloedgraven op te leiden (hoger in het beekdal te leggen en over de hoogtelijnen langs de rand het beekdal af te leiden naar een punt verder benedenstrooms waar geen relevante natuurwaarden zijn).

De meest effectieve en praktische effectgerichte maatregel om de versnelde erosie te **beperken** of geheel op te heffen is waarschijnlijk om de overstorten en lozingen verder benedenstrooms te laten plaats vinden. Hiervoor zijn meerdere varianten denkbaar die ieder hun voor- en nadelen hebben. Te denken valt aan:

- de aanleg van een buis die uitmondt in een laag (komvormig) gelegen buffer in een (reeds voedselrijk) gebied zonder natuurwaarden waar het water tijdelijk kan worden geborgen en infiltreren;
- wellicht kunnen meer minder waardevolle delen van de beekdalen worden ingezet om meer berging en buffers te realiseren waarbij het schone deel van de piekafvoeren langer kan worden vastgehouden en zeer geleidelijk kan infiltreren (na afvangen van de first flush en een bodempassage).

Dit betreft maatwerk en dient te worden bepaald bij het opstellen van inrichtingsplannen. Met een geschikt model kunnen de (on)mogelijkheden globaal worden verkend. De maatregelen die reeds worden genomen en de effectiviteit daarvan volgen grotendeels al uit het programma Water in balans.

Welke maatregelen kunnen aanvullend ingezet worden om hernieuwde insnijding van herstelde beken te voorkomen?

Hernieuwde insnijding duidt erop dat het herstel toch niet duurzaam is geweest. Het is een open deur, maar voor aanvullende maatregelen dient eerst te worden gezocht naar bronmaatregelen en daarna eventueel naar aanvullende effectgerichte maatregelen. Juist benedenstrooms obstructies en ter plaatse van erosie zouden platte stenen en zogenaamde woelbakken uitkomst kunnen bieden, mits ze de energie voldoende reduceren. Af- en omleiding van piekafvoeren zijn ook effectieve maatregelen. De mogelijke maatregelen en varianten om de schuifspanningen in de bedding te reduceren zijn sterk afhankelijk van de lokale belangen en omstandigheden. Aanvullende effectgerichte maatregelen die tot een beperking van de erosie(snelheid) kunnen leiden moeten vooral leiden tot geleidelijke overgangen.

De enige manier om de onnatuurlijke diepe insnijding of versnelde erosie tegen te gaan en aquatische organismen en de grondwaterafhankelijk natuur langs de beek te behouden is door zeer drastische maatregelen te nemen in de oppervlakkige afstroming van met name verharde oppervlakken in het stedelijk gebied. Dit moet ertoe leiden dat de beken geheel worden gevrijwaard van de grote hydraulische stress die de overstorten en oppervlakkig afstromende oppervlakken veroorzaken. Dat kan alleen door het hemelwater zodanig te bufferen en conserveren dat het geleidelijk kan infiltreren. Hiervoor zouden grootschalige waterkelders of cisternen in aanmerking kunnen komen (in plaats van bergbezinkbassins). Dit vergt echter wel grote investeringen en een cultuurverandering. Dit betreft wellicht ook meer een maatschappelijk en sociaal cultureel probleem.

7. Literatuur

Aggenbach ea., 2009. Preadvies beekdallandschappen: knelpunten, kennislacunes en kennisvragen voor natuurherstel in beekdalen. Ministerie van LNV, Directie Kennis, Ede.

Basisrioleringsplan Limmel Heugem Bijlagen Samenwerkingsverband Maas- en Mergelland. Nelen & Schuurmans en SWECO 12 januari 2017.

Beel A., Govers G. & Notebaert B. (2006) Scenario's voor de reductie van erosie en sedimentaanvoer in Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2006/12, Onderzoeksgroep Fysische en Regionale Geografie, K.U.Leuven.

Beken Stroom. Leidraad voor ecologisch beekherstel. Verdonschot, P. et al, 1995. WEW-06 STOWA 95-03, Utrecht.

Besselink, D. et al., 2017. Handboek ecohydrologische systeemanalyse beekdallandschappen, STOWA (2017-05)

Boardman, J. and J. Poesen, 2006. Soil erosion in Europe, John Wiley & Sons Ltd.

Bobbink, R., R.J. Bijlsma, E. Brouwer, K. Eichhorn, R. Haveman, P. Hommel, T. van Noordwijk, J. Schaminée, W. Verberk, R. de Waal & M. Wallis de Vries, 2008. Preadvies hellingbossen in Zuid-Limburg. Rapport DK nr. 2008/094-O. Directie Kennis, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Ede.

Campuzano Izquierdo, G., 2017. Are woody debris jams suitable to prevent the Noor brook channel bed erosion? Msc Thesis Hydrology and Quantitative Water Management, Wageningen.

Campuzano Izquierdo, G. and Dijkema, R. Proposal February 2018. Monitoring and modelling channel bed erosion and groundwater issues in the Noorbeemden site (Natura 2000).

Cuppen, H.P.J.J. en H.K.M. Moller Pillot, 1978. Een orienterend hydrobiologisch onderzoek naar de bronnen en bronbeken in Mergelland, werkrapport Mergelland, bijlage I, Leersum.

De Mars, H. 2017. Herstel van de Zuid-Limburgse hellingmoerassen, het Kalkmoeras in het bijzonder VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren Rapport OBN2017/213-HE Driebergen.

De Mars, H., A.J.P Smolders & B. van der Weijden (2017b). Kalktufbronnen en kalkmoerassen in Limburgse N2000-gebieden. Rapport BE5763. Royal HaskoningDHV /B-WARE, Maastricht.

De Mars, H. en Van der Weyden. 2018. Alluviale bossen in beekdalen; debietmetingen en waterkwaliteit.

De Roo, A.P.J., Wesseling C.G., Ritsema C.J. 1996. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins: I: theory, input and output. Hydrological Processes 10: 1107–1117.

De Vries, F., W.J.M. de Groot, T. Hoogland & J. Denneboom. 2003. De Bodemkaart van Nederland digitaal. Toelichting bij inhoud, actualiteit en methodieken korte beschrijving van additionele informatie. Alterra-rapport 811, Wageningen.

De Waal, R.W., R.J. Bijlsma, & H.T.L Massop, 2018. Bodemerosie in en rond Natura2000-gebieden in het Heuvelland; De herkenning en beoordeling van erosie- en sedimentatieverschijnselen. *Natuurhist. Maandblad*, 107(9):159-164.

De Waal, R.W., R.J. Bijlsma, R. Hessel, P.W.F.M. Hommel, J. Kros, H.T.L Massop, G.J. Noij, 2017. Noodzaak en lokaliserings van bufferstroken rond Natura 2000-gebieden in het Heuvelland, OBN217-HE.

Dijkstra, R. en Van Lanen, H.A.J. 1998. Monitoring and modelling of springflow in the Noor catchment (the Netherlands).

Dijkstra, R. ea., 1998. De afvoer van de Noor (Zuid-Limburg). Periode 1992- 1997.

Eekhout, J.P.C. & Hoitink, A.J.F., 2014 Morfodynamiek van Nederlandse Laaglandbeken. STOWA Rapport, Amersfoort.

Eekhout J.P.C., R.G.A.Fraaije, A.J.F. Hoitink, 2014. Morphodynamic regime change in a reconstructed lowland stream. *Earth Surface Dynam* 2014;2:279-93.

Feld, C.K. ea., 2011. From natural to degraded rivers and back again: A test of restoration ecology theory and practice, *Advances in Ecological Research* Vol. 44, Elsevier Ltd.

Higler L.W.G. & Mol A.W.M. 1985, Ecological types of running water based on stream hydraulics in the Netherlands, *Hydrobiol. Bull.* 18.

Hill, G., Maddock, I. en M. Bickerton, 2013. Testing the relationship between surface flow types and benthic macroinvertebrates, *Ecohydraulics: an integrated approach* Edited by Ian Maddock, Atle Harby, Paul Kemp, and Paul Wood. Hoboken (NJ): Wiley Blackwell.

Jetten V, Govers G., Hessel R. 2003. Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrological Processes* 17: 887-900.

Kessels, K.G.W., 2012. Eco-hydrogeology of the Noorbrook catchment. Msc Thesis Hydrology and Quantitative Water Management, Wageningen University.

Laseroms, R., 1996. Ecologisch beekherstel. LBL-mededeling 208, Landinrichtingsdienst, Utrecht.

Laseroms, R., 2013. Hydromorfologisch onderzoek Lunterse Beek. LWRO-rapport 1112.01, 's-Hertogenbosch.

Leenders, W.H. & F. Brouwer, 1988. De bodemgesteldheid van het herinrichtingsgebied Centraal Plateau: resultaten van een bodemgeografisch onderzoek en geschiktheidsbeoordeling voor akkerbouw, weidebouw, tuinbouw (fruitteelt) en bosbouw. *Stiboka-Rapport 1994*, Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Maddock, I., A. Harby, P. Kemp en P. Wood, 2013. *Ecohydraulics: an integrated approach* Edited by Ian Maddock, Atle Harby, Paul Kemp, and Paul Wood. Hoboken (NJ): Wiley Blackwell.

Molen, P.C. van der, G.J. Baaijens, A. Grootjans en A. Jansen, 2010. LESA. Landschapsecologische systeemanalyse.

Mosselman, E., 2018. Achtergronden van morfodynamische modellering en advies voor STOWA. Deltares, Delft. Memo 23 januari 2018. Project 11201836-000-ZWS-0006.

Nijboer RC, Van den Hoorn MW, Van den Hoek TH, Wiggers R, Verdonschot PFM (2003) Keylinks: ecologische processen in sloten en beken; II de relatie tussen afvoerdynamiek, temperatuur en de populatiegroei van *Agapetus fuscipes* (no. 1069). Alterra

Poesen, J., 1993. Gully topology and gully control measures in the European loess belt. In: Wecherek (ed.), 1993. Farm Land Erosion: In Temperate Plains Environment and Hills.

Reeze, B. en R. Laseroms, 2018. Ecologische sleutelfactoren stromende wateren, uitwerking hydrologie en morfologie. Bart Reeze Water & Ecologie/ LWRO, Harderwijk/ 's-Hertogenbosch.

Rees, J. 1989. Cultuurlandschap en historisch-landschappelijke waarden in het herinrichtingsgebied Centraal-Plateau en het gebied van de aanpassingsinrichting Beek, rapport nr. 2011, Wageningen, Stichting voor Bodemkartering.

RGD, 1988. Geologische kaart van Zuid-Limburg en omgeving – Oppervlaktekaart 1:50.000. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Schaminée, J.H.J. ea., 2009. Preadvies Beekdalen Heuvellandschap. Ministerie van LNV, Directie Kennis, Ede.

Schumm, S.A., 1977. The fluvial system, John Wiley & Sons, New York.

Steege, A. et al., 2000. Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of Central Belgium, *Geomorphology* 33: 25-36.

Valk, K., 2016. Stopping incision of the Noor. Msc Thesis Hydrology and Quantitative Water Management

Van der Lee, G.H., 2020. Persist or perish: critical life stages determine the sensitivity of invertebrates to disturbances. Wageningen University and Research, Wageningen.

Verstraeten, G., Van Oost, K., Van Rompaey, A., Poesen, J. en Govers, G., 2001. Integraal land-en waterbeheer in landelijke gebieden met het oog op het beperken van bodemverlies en modderoverlast (proefproject gemeente Gingelom), Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap – Afdeling Land, eindrapport juli 2001.

Verstraeten, G., et al., 2017. Variability in fluvial geomorphic response to anthropogenic disturbance, *Geomorphology* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.027>

Waterschap Roer en Overmaas, 2010. Eindrapportage GGOR-maatregelen Heuvelland, Sittard.

Willems, P., 2008. A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models, *Environ. Model. Softw.*, doi:10.1016/j.envsoft.2008.09.005

Winteraeken, H.J. & W.P. Spaan. 2010. A new approach to soil erosion and runoff in South Limburg the Netherlands. *Land Degrad. Develop.* 21: 346–352.

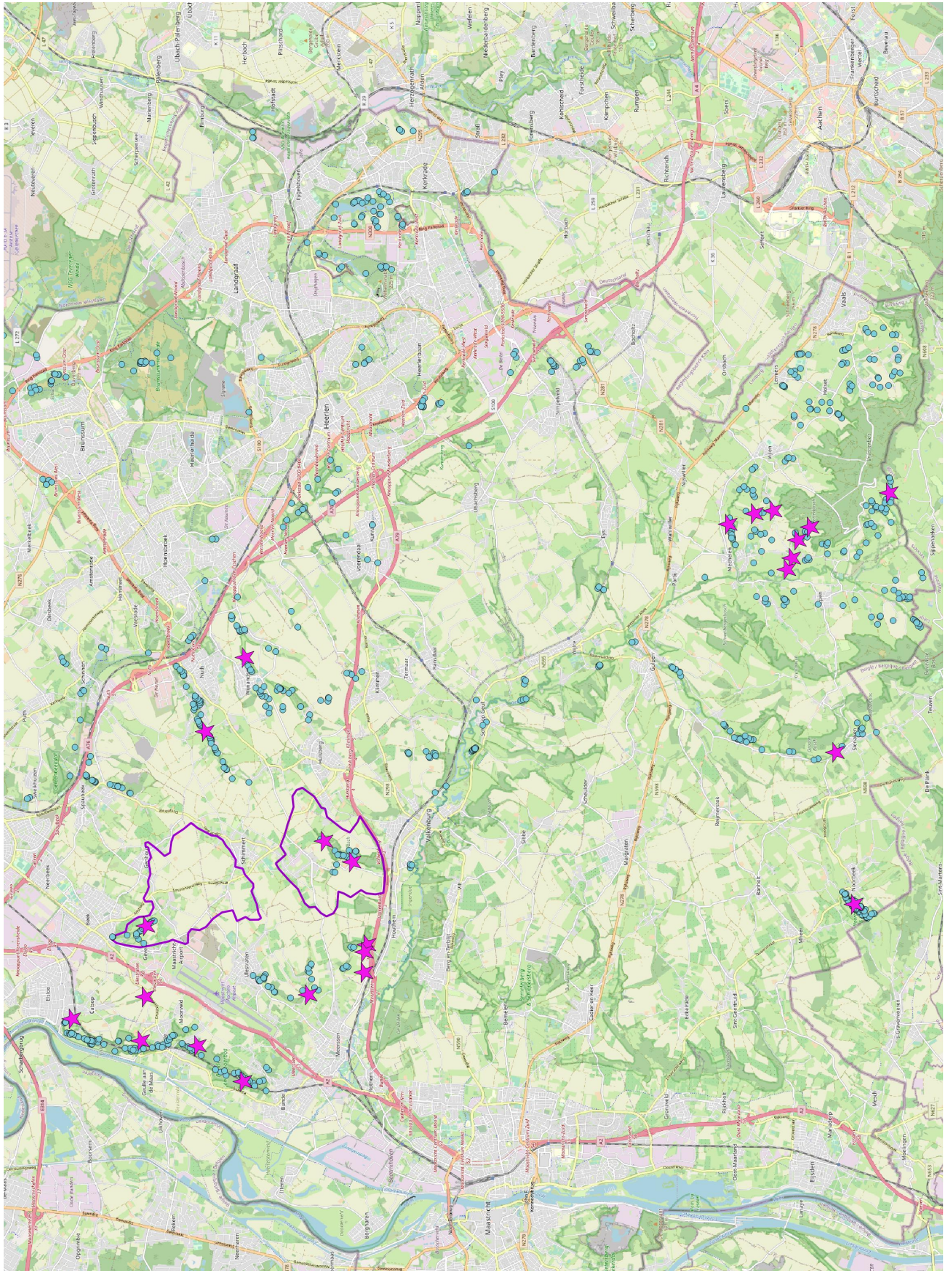
Wolfs, V. en P. Willems, 2018a. Methodologie voor het karakteriseren van de afvoerdynamiek van een stroomgebied – Deel I: Methodologie. Sumaqua, Leuven.

Begrippen

Achterloopsheid	lekstroom achter een constructie om.
Cohesie	onderlinge aantrekkingskracht tussen moleculen van eenzelfde stof in vaste vorm of in vloeibare vorm.
Fluviatiele erosie	erosie door stromend water in een bedding.
Hyporheische zone	zone in de beddingbodem waar oppervlaktewater en grondwater bij elkaar komen en zich mengen.
Kalktufbronnen	bronnen waar met calciumbicarbonaat verzadigd grondwater dagzoomt waaruit in de bron en bronbeken vervolgens kalktuf (calciumcarbonaat) neerslaat in de vorm van korsten of kalktufbanken.
Kalkmoeras	een kwelmoeras dat wordt gevoed met kalkrijk grondwater en waar in de vaak venige bodem ook neerslag van kalktuf kan plaatsvinden. Kalkmoerassen bieden vaak plaats aan zeer soortenrijke, laag productieve vegetaties met tal van Rode lijstsoorten.
Onderloopsheid	lekstroom onder een constructie door.
Schuifspanningen	de spanning die ontstaat als gevolg van het stromen van water langs een voorwerp (als het de bodem betreft is het bodemschuifspanning).
Turbulente stroming	stroming die zich niet gelaagd, maar in wervels verplaatst.

Bijlagen

Bijlage 1: Overzicht locaties met diepe insnijding



Bijlage 2: Selectie onderzoeksgebieden

Voorgestelde criteria voor selectie van onderzoeksgebieden

Op basis van aanvullingen van het deskundigenteam, onze veldverkenningen en de inventarisatie zijn we samen gekomen tot de volgende selectiecriteria:

1. onnatuurlijk diepe insnijding gesignaleerd of vermoed (met aanduiding van de locatie);
2. diepe insnijding vormt een serieus probleem of risico voor de ecologie (m.n. grondwater-afhankelijke natuur);
3. er is sprake van urgentie;
4. aanwezige relevante natuurwaarden en habitattypen in het beekdal worden bedreigd;
5. bovenstrooms stedelijk gebied aanwezig;
6. overstort(en) aanwezig;
7. effectgerichte maatregelen zijn reeds (gedeeltelijk) uitgevoerd;
8. experimenten vormen geen risico voor aanwezige aquatische natuurwaarden;
9. meetgegevens van waterpeilen en debieten beschikbaar;
10. hydrologische modellen beschikbaar;
11. schaal van het effect;
12. effecten van uitgevoerde experimenten en maatregelen zijn meetbaar.

Het uiteindelijke resultaat van de toepassing van de selectiecriteria is in de onderstaande tabel weergegeven.

onderzoeksgebied	opmerking	diepe insnijding waargenomen	risico voor ecologie	urgentie	natuurwaarden bedreigd	stedelijk gebied	overstort(en)	effectgerichte maatregelen uitgevoerd	experiment geen bedreiging voor natuurwaarden	meetgegevens beschikbaar	hydrologisch model	schaal effect	effecten maatregelen meetbaar
Strabeker Vloedgraaf							1	keien			3Di		
Keutelbeek bij Kelmond			?		?		1	keien			InfoW		
Leukderbeek bij Geulle					?		1		?		3Di	technisch	
Hussebeek bij Broekhoven			?		?		1		?		3Di	technisch	
Hulsbergerbeek bij Wijnandsrade							1	keien&klei			Sobek		?
Noor bij Noorbeek							6?	WUR +?			div		
Klitserbeek bij Bommerig											InfoW		
Mechelderbeek Hermensbeek bij Rot								locatie?			InfoW		
Berghorsbeek Bunder- en Elsloerbos	locatie?		?			?		?			3Di?	technisch	
Bosbeek Bunder- en Elsloerbos	locatie?		?					?			3Di?		
Watervalderbeek bij Meerssen	locatie?						2				3Di		
Hemelbeek Bunder- en Elsloerbos							?	?			3Di		
Belleterbeek bij Cotessen	locatie?						?	?			InfoW		
Eyserbeek bij Goedenraad	locatie?						?	?		?	InfoW		
Jeker bij Neercanne	locatie?						?	?		?			
Cotesserbeek	locatie?							?			InfoW		
Prikkenserbeekje bij Heerlen	locatie?						?	?					
Wijnandsradebeek	locatie?						?						
Vlikerwaterlossing bij Ulestraten	locatie?						1				3Di		
nog 30 beken?													
zeer negatief													
negatief													
neutraal													
positief													
zeer positief													

Hieruit zijn de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf geselecteerd.

Bijlage 3: Overzicht locaties Strabeker Vloedgraaf

Keutelbeek

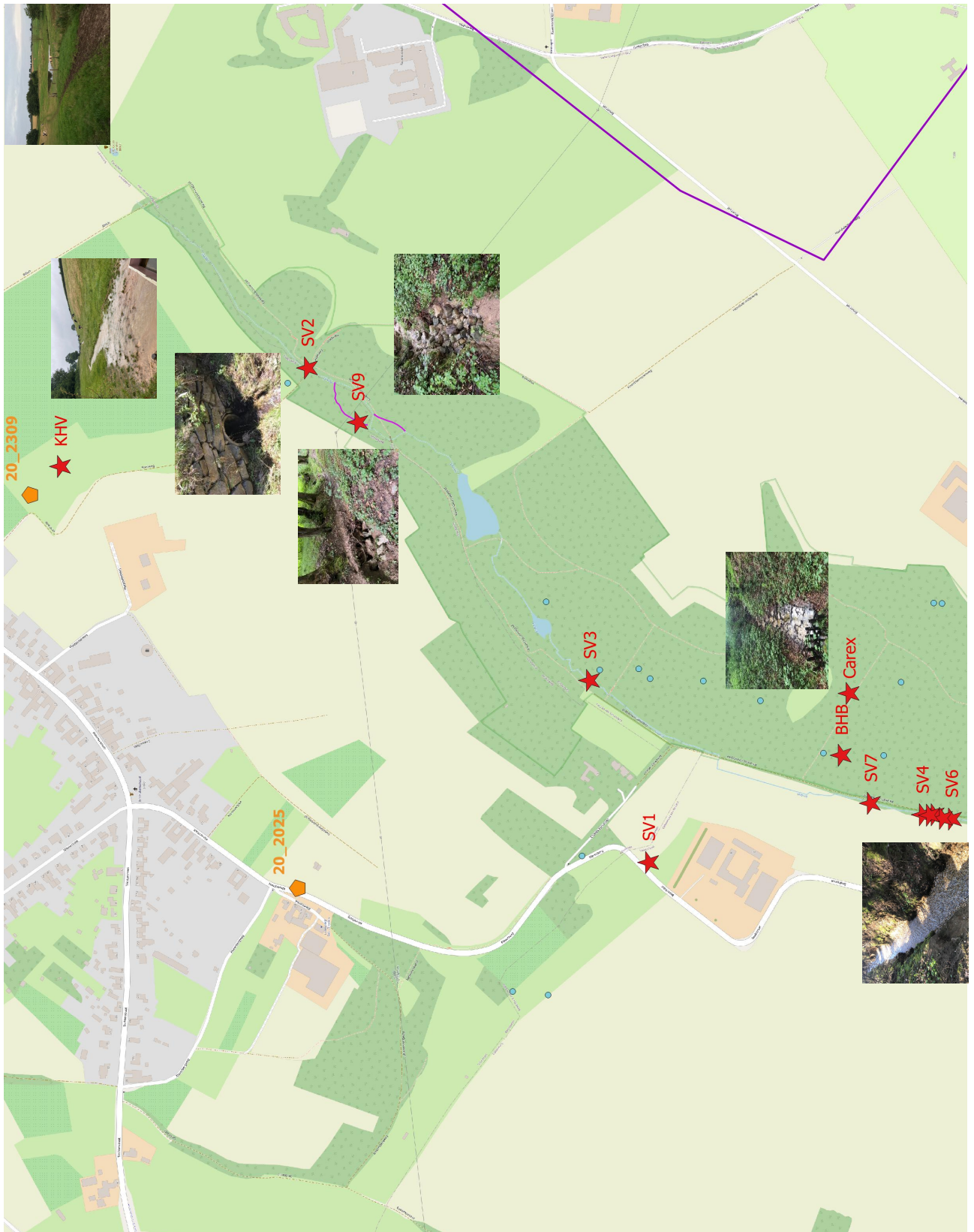


Alle meetpunten in de Keutelbeek

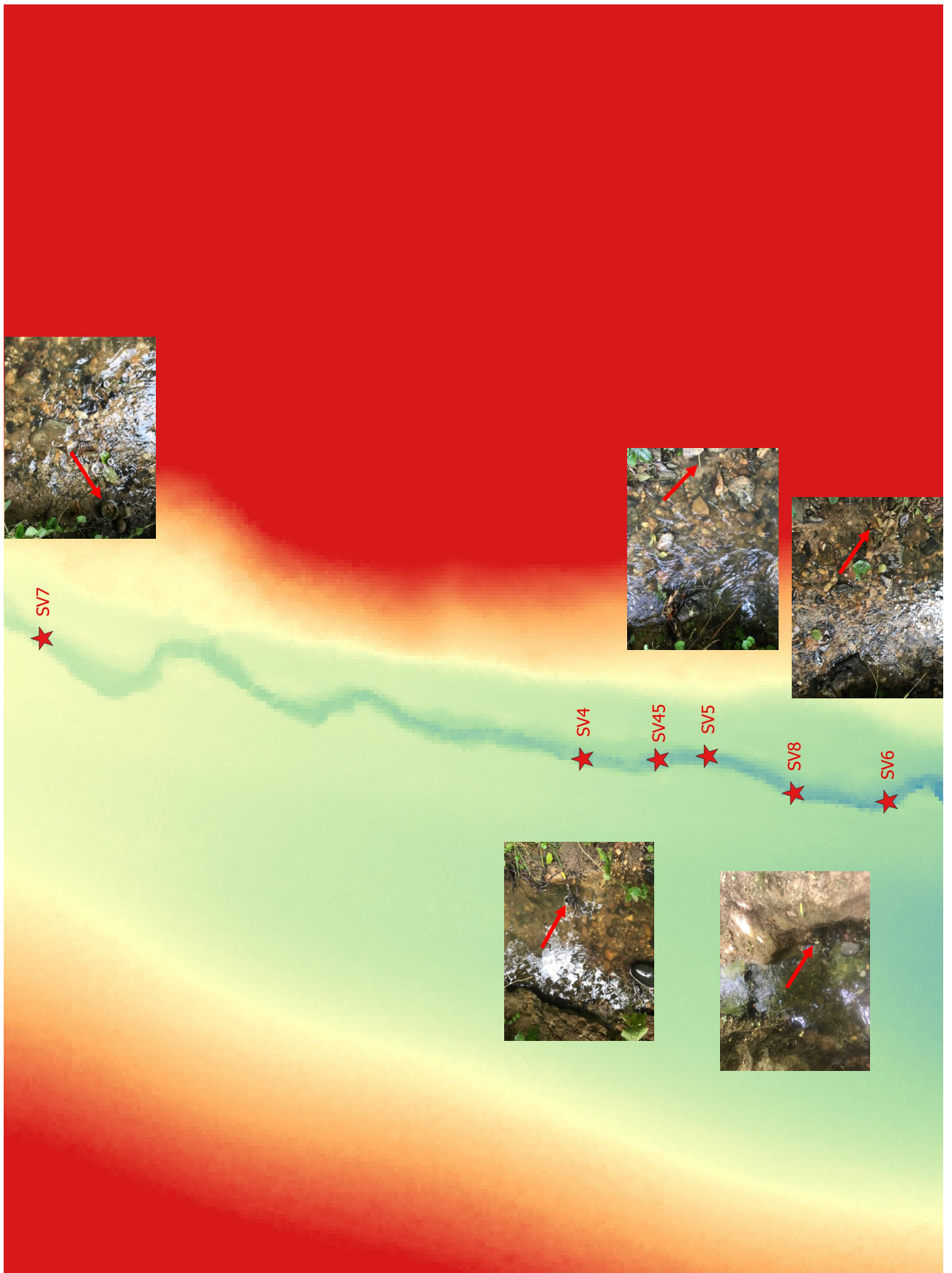


Experimentele traject in de Keutelbeek

Strabeker Vloedgraaf



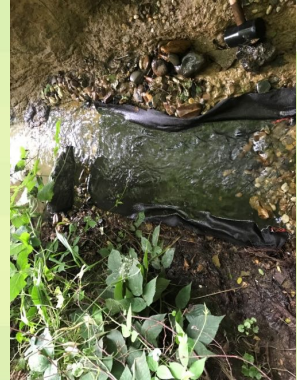
Alle meetpunten in de Strabeker Vloedgraaf (SV1 = VBK)



Alle meetpunten in experimentele traject



★ SV5



matje 5

matje 6

worteldoek



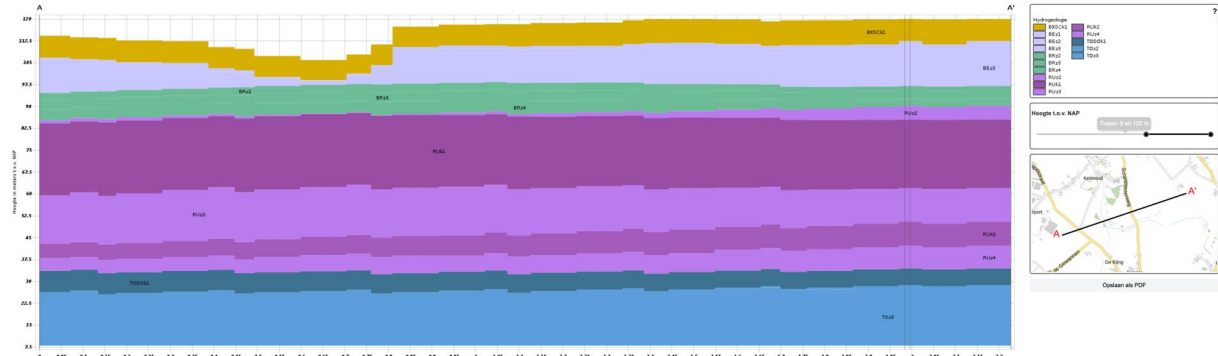
★ SV8

Details aanvullende maatregelen in vm suppletietraject

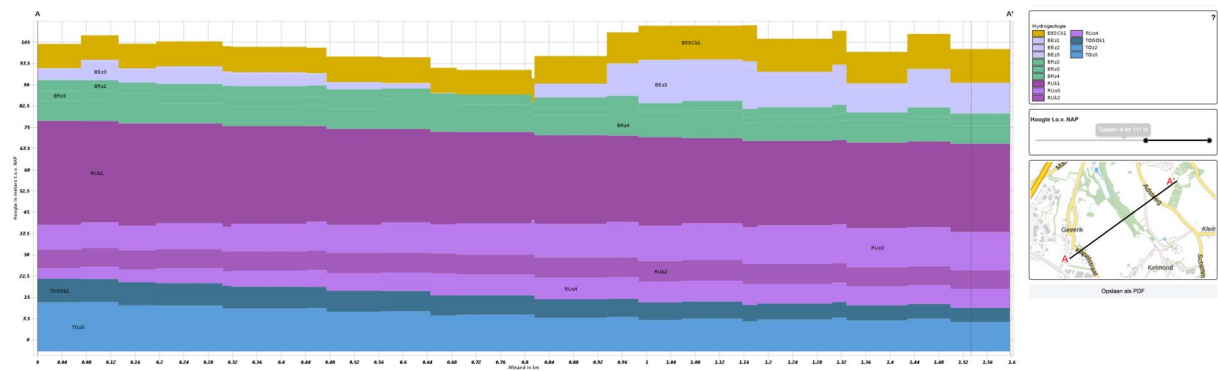
Bijlage 4: Figuren watersysteemanalyses

Geologische bodemopbouw

Verticale doorsneden Keutelbeek (REGIS II v2.2)



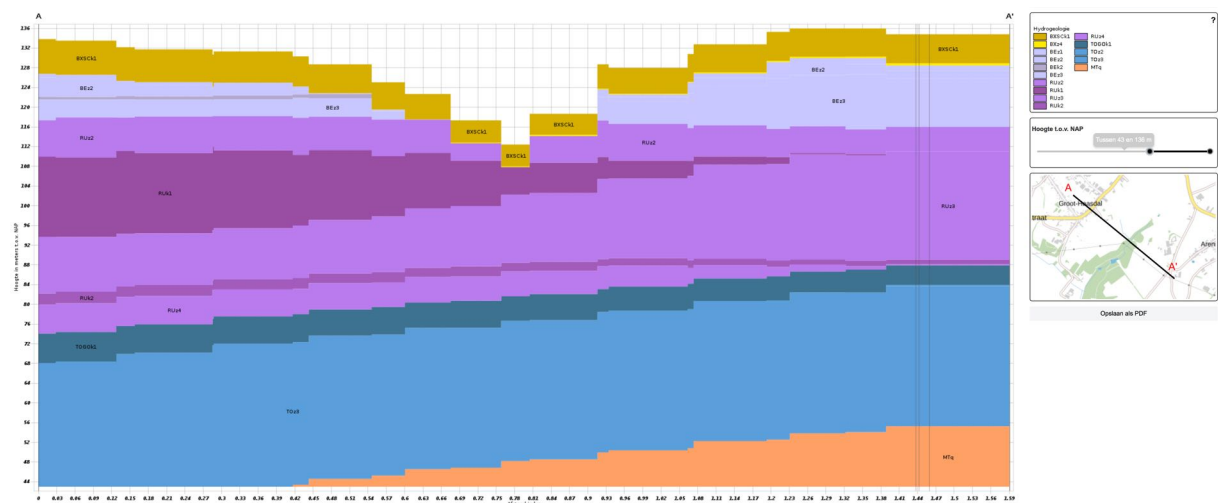
Keutelbeek bovenstrooms



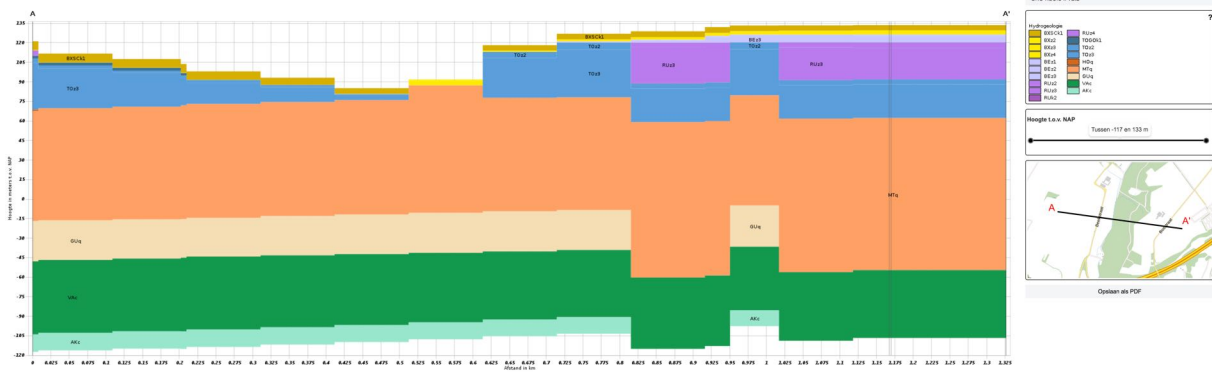
Keutelbeek onderzoekstraject

Het stroomgebied van de Keutelbeek heeft een vrij uniforme geologische bodemopbouw met een dikke deklaag van de Formatie van Boxtel (löss), daaronder de Formatie van Beegden, die in het beekdal dun is en daaronder de Formatie van Breda.

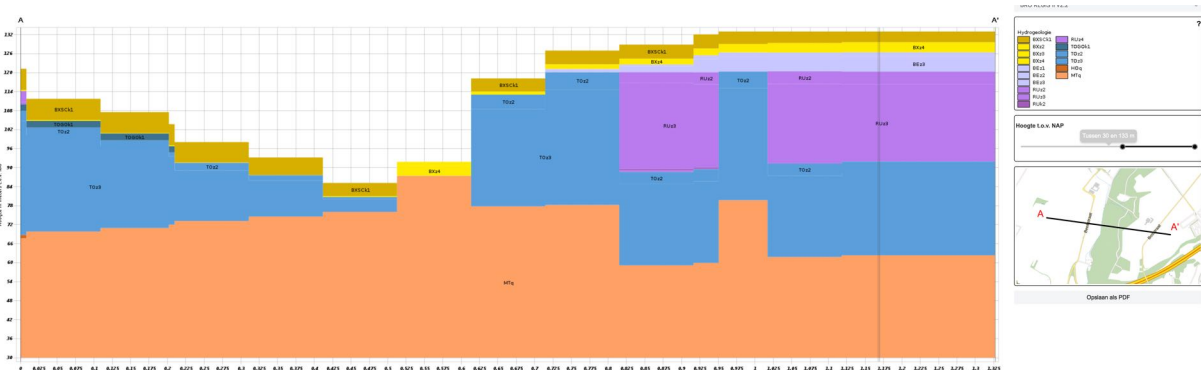
Verticale doorsneden Strabeker Vloedgraaf (REGIS II v2.2)



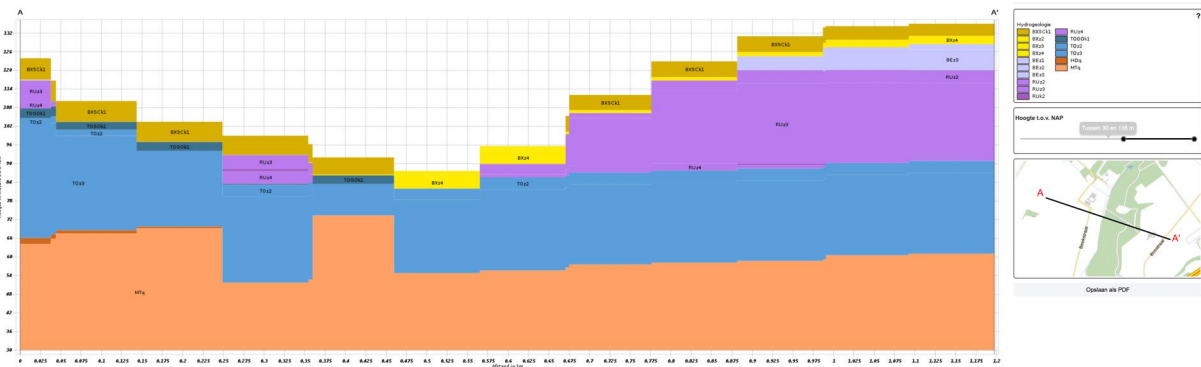
Strabeker Vloedgraaf bovenstrooms



Onderzoekstraject (alle formaties, inclusief breuklijn)



Onderzoekstraject toplaag en invloedseer beek

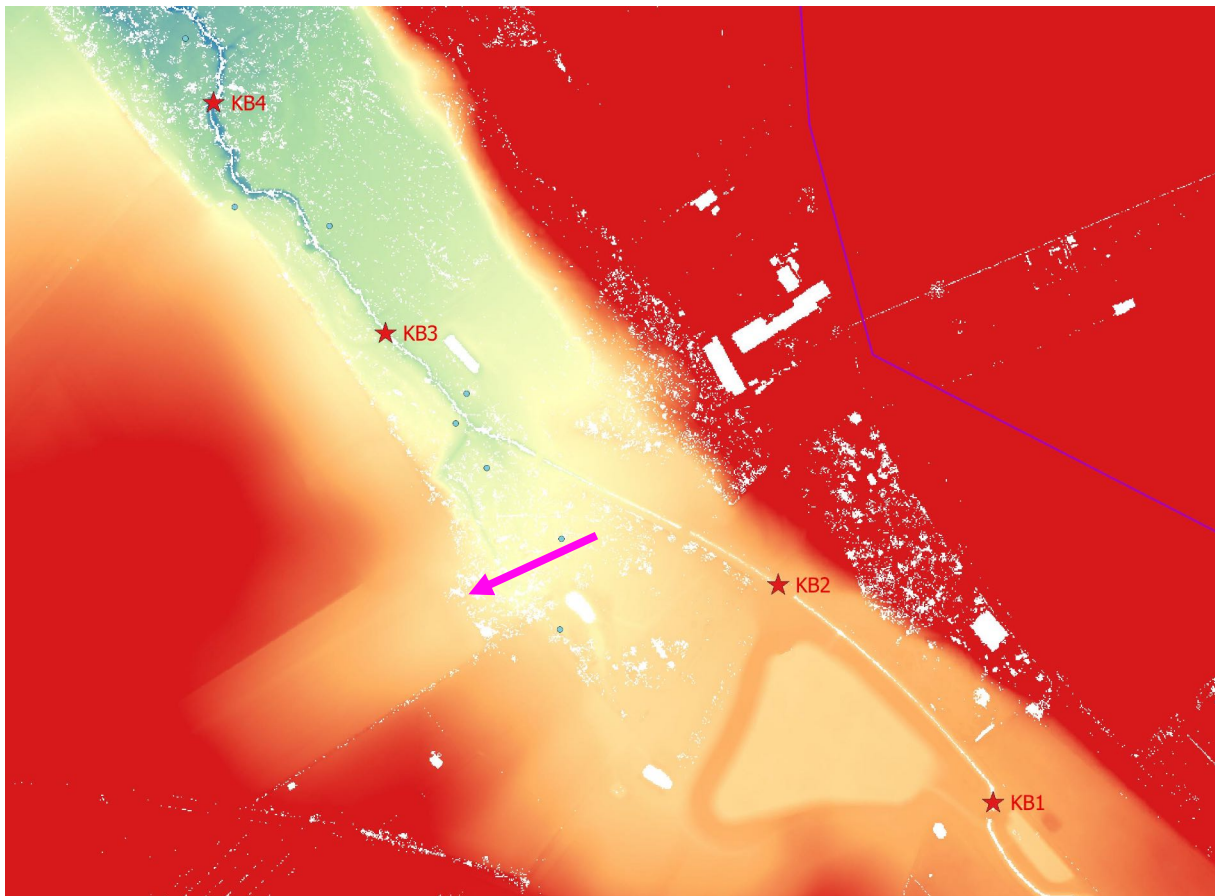


Onderzoekstraject toplaag en invloedseer Berkenhofbeek

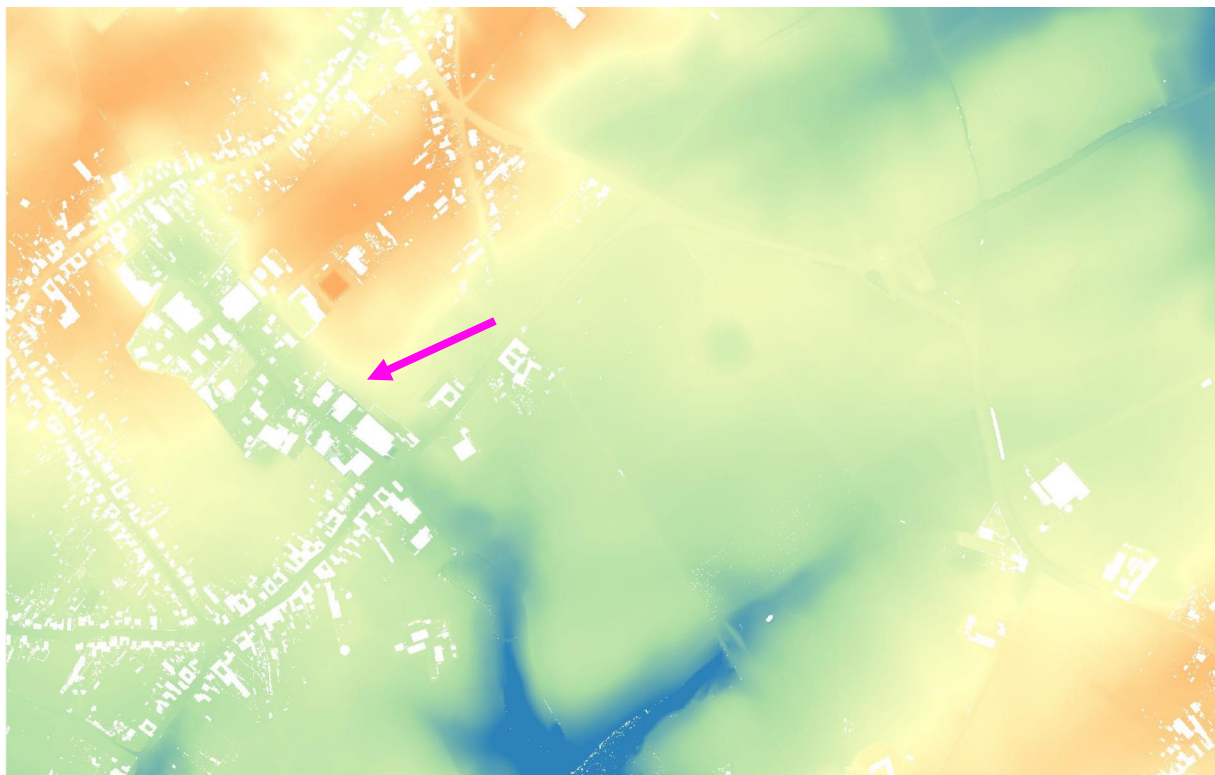
Het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf heeft een sterk variërende geologische bodemopbouw met een deklaag van de Formatie van Boxtel (löss) die in dikte varieert, daaronder op de dalflanken de Formatie van Beegden, die in het beekdal dun is of ontbreekt. Daaronder bevindt zich op dalflanken de Formatie van Rupel, die in het beekdal ontbreekt, vervolgens de Formatie van Tongeren en tenslotte de Formatie van Maastricht, die lokaal in het beekdal dichter onder het maaiveld ligt.

Hierbij wordt opgemerkt dat de verticale dwarsdoorsneden op korte afstand sterk verschillen. Dit is mede zichtbaar in de doorsnede van de Berkenhofbeek.

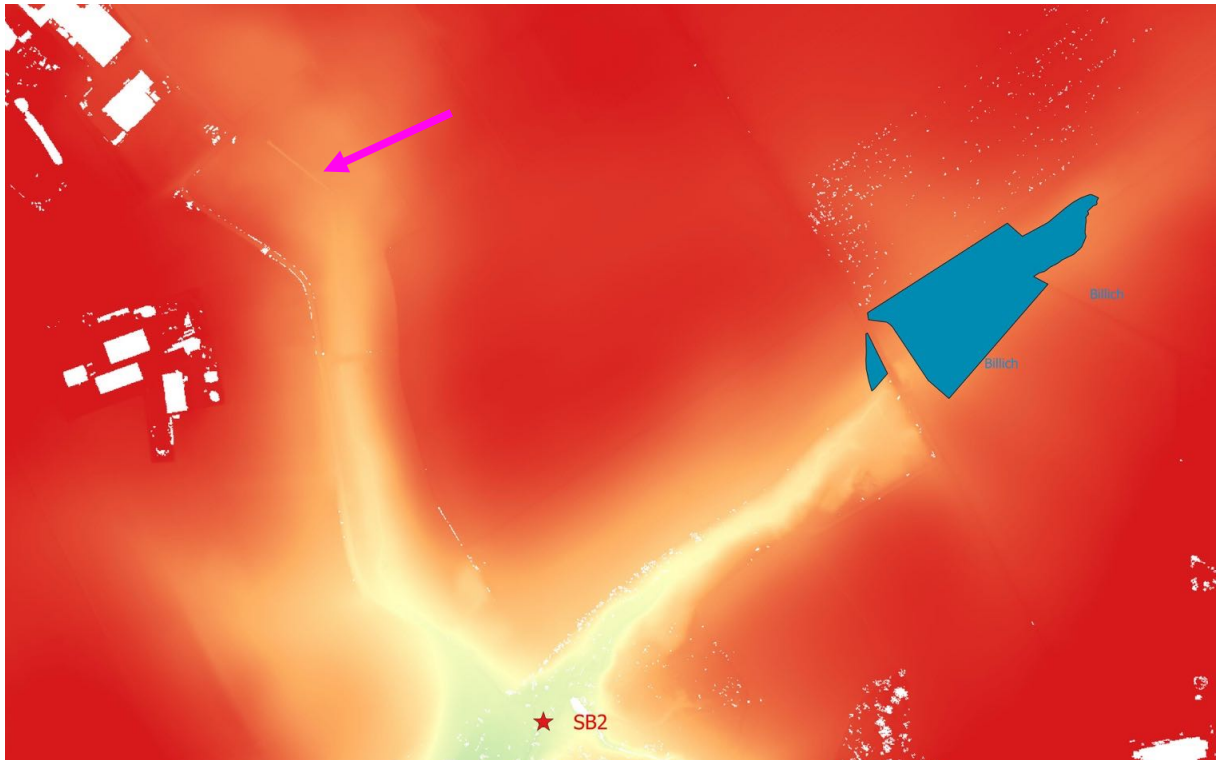
Antropogene invloeden



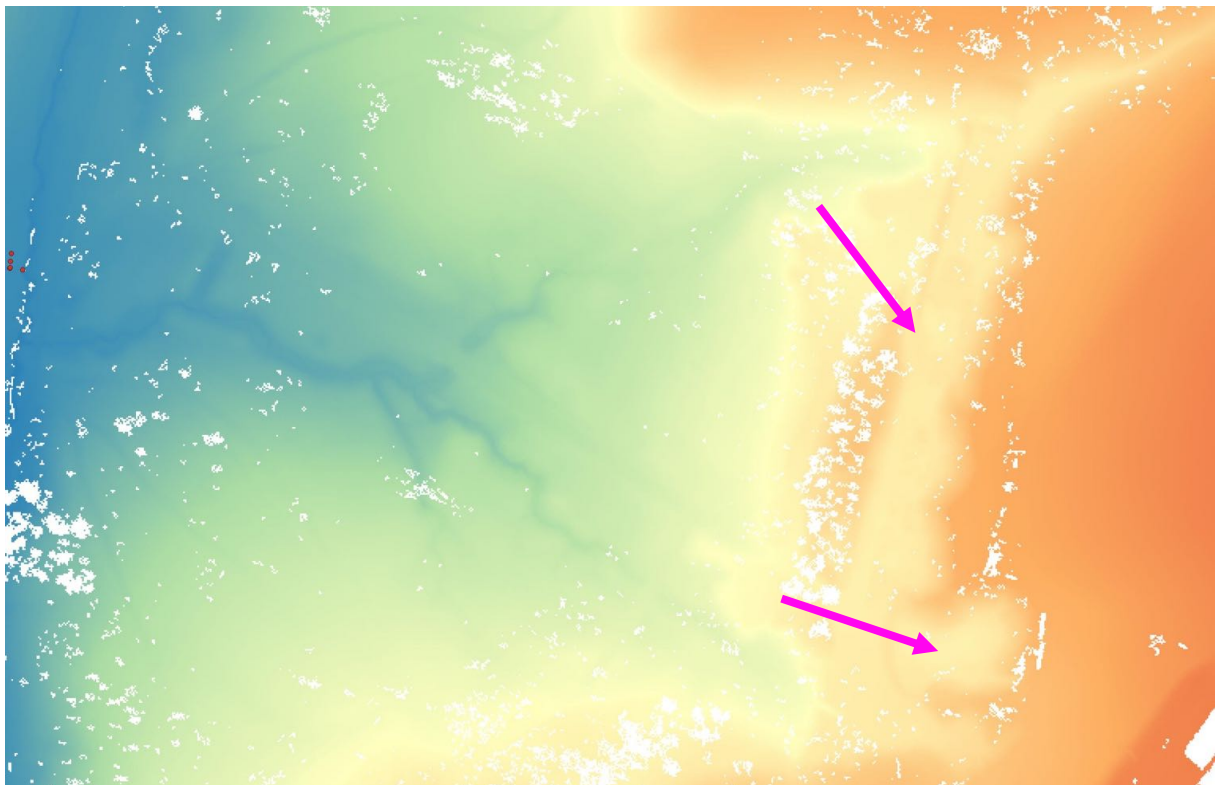
Sterke antropogene beïnvloeding en verlaagde ligging Keutelbeek



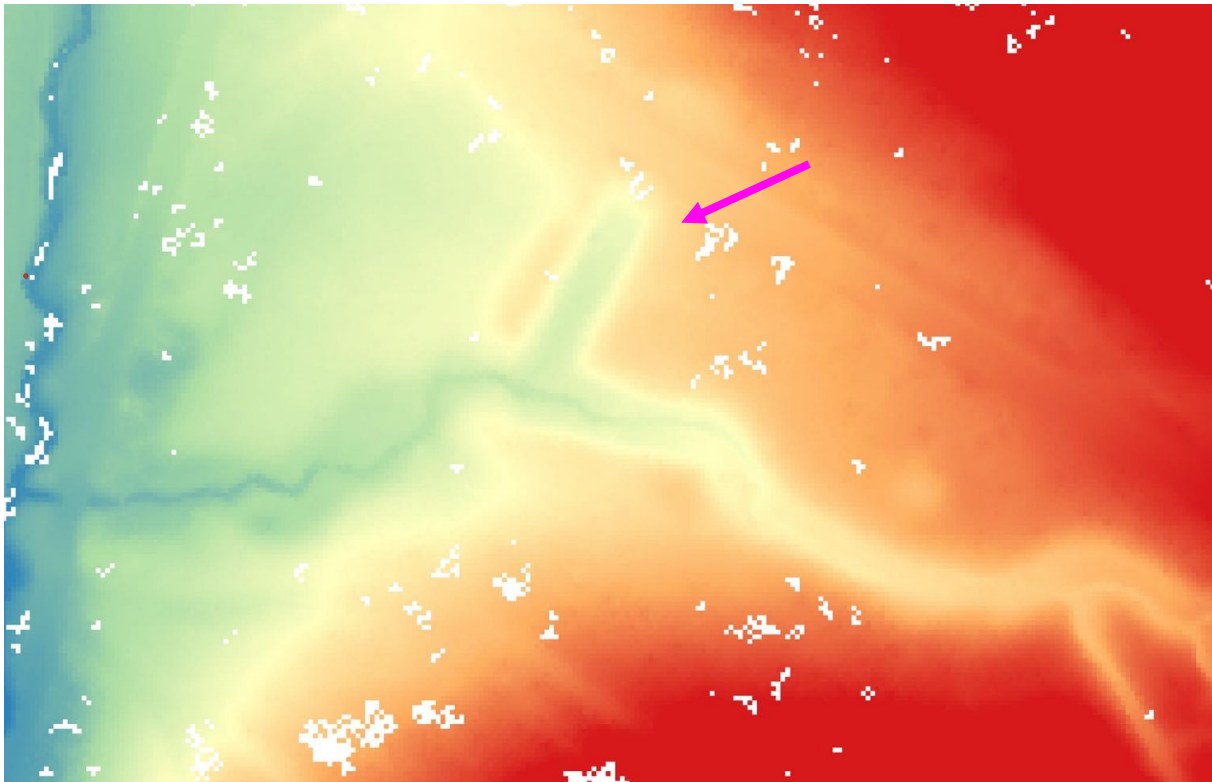
Sterk verlaagde ligging bedrijventerrein De Steeg Kleinhaasdal



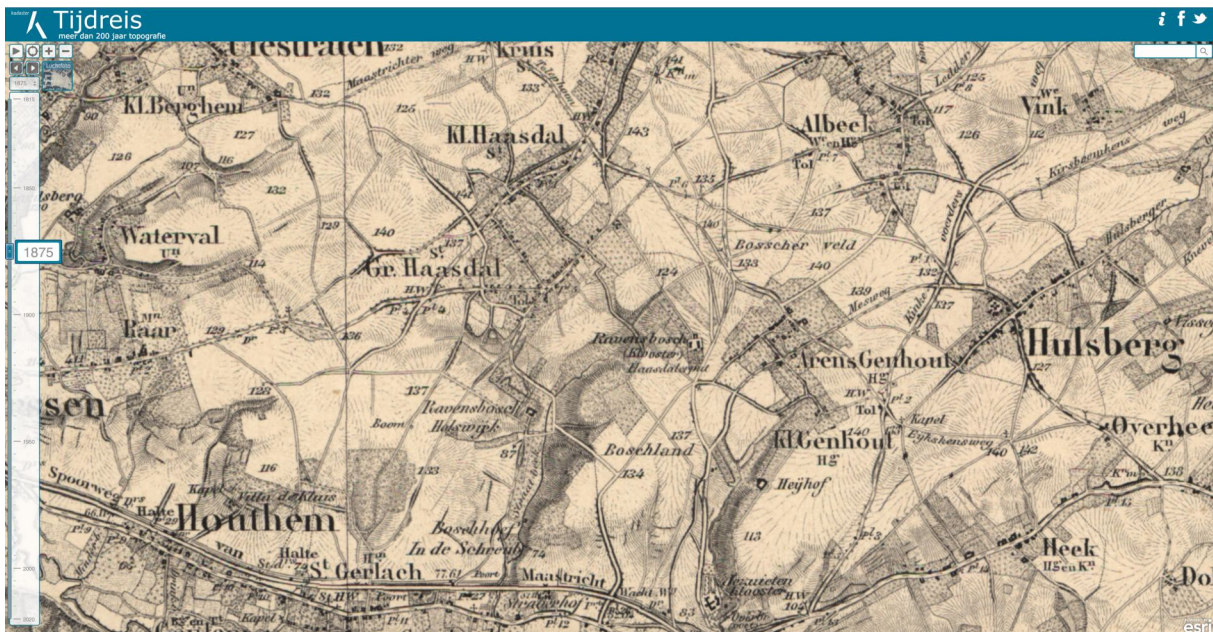
Kleinhaasdalervloedgraaf en pad zichtbaar



Sterk verstoorde bodemopbouw Berkenhofbeek



Sterk verstoorde bodemopbouw Berkenhofbeek



Historische kaart 1875

Bijlage 5: Gegevens riolering Schimmert eo

In deze bijlage zijn de belangrijkste kenmerken van de riolering van Groot- en Klein Haasdalen en Schimmert opgenomen in de vorm van enkele figuren en zeer beknopte beschrijvingen. De bron is het Basisrioleringsplan Limmel Heugem Bijlagen Samenwerkingsverband Maas- en Mergelland Nelen & Schuurmans en SWECO 12 januari 2017.

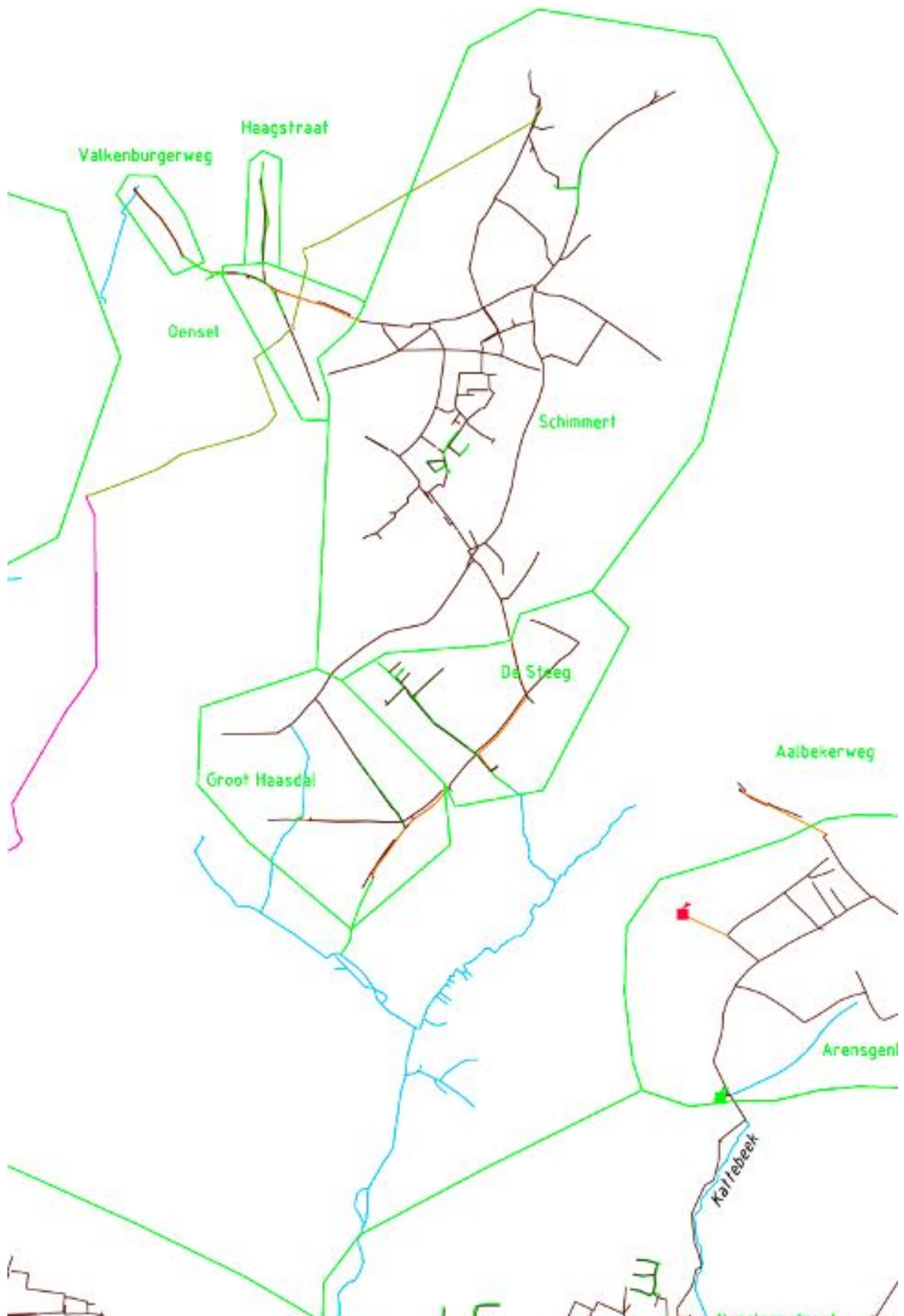
Door de ligging van het rioleringsgebied op het plateau watert het af naar de beken die rondom het plateau zijn gelegen. Hier wordt alleen ingegaan op de Keutelbeek en de Strabeker Vloedgraaf.

Het rioleringsgebied zit zodanig in elkaar dat in principe het rioleringsgebied Groot Haasdalen (SC1) via het rioleringsgebied De Steeg (Klein Haasdalen, SC2) naar het rioleringsgebied Schimmert (SC0) stroomt.

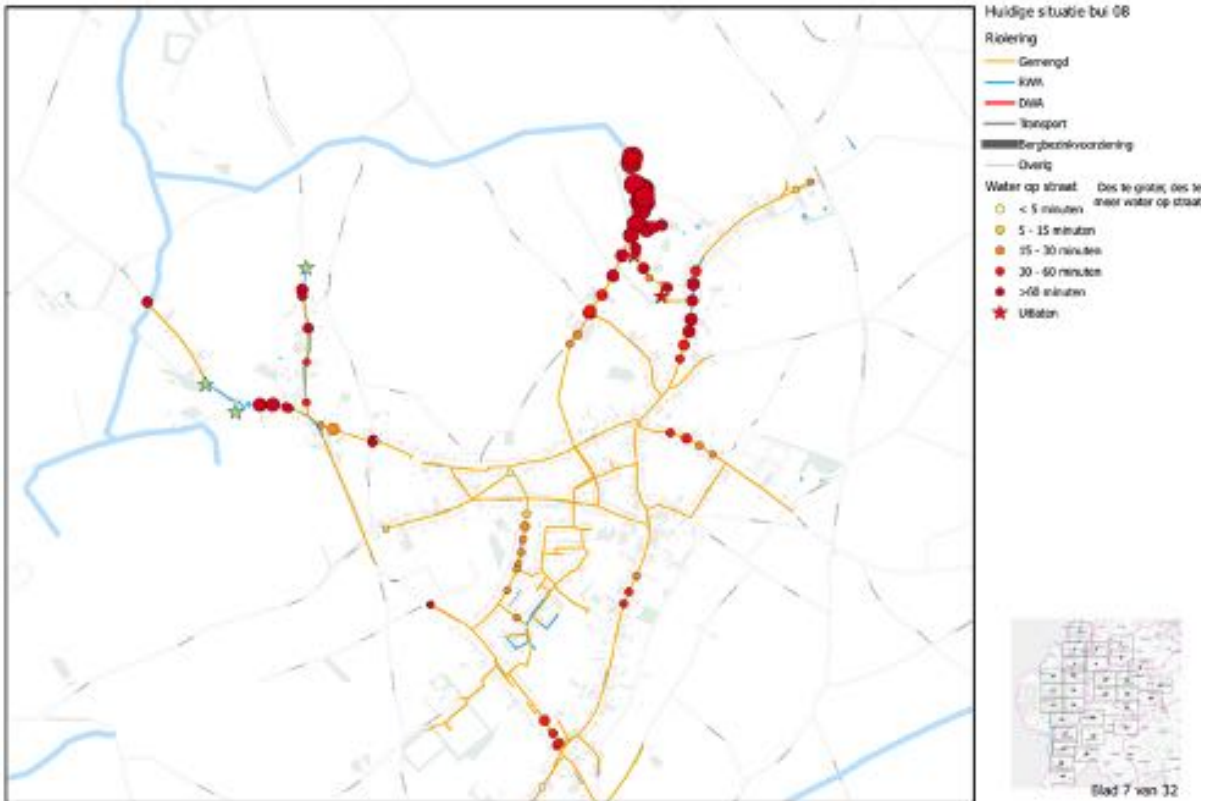
code	naam	locatie	stelseltype	bestemming	verharding (ha)	norm poc (mm/h)	poc (m3/h)	doorvoer (m3/h)	tot HWA (m3/h)
SC0	Schimmert GEM	Vauwerhofweg (_AR_18)	Gemengd	WBL	36.55	0.7	255.9	33	288.9
SC1	Schimmert Groot Haasdalen	Kleverstraat (2022)	Gemengd	SC2	6.67	0.7	46.7	0	46.7
SC2	Schimmert De Steeg	Hoekweg (2309)	Gemengd	SC0	2.62	0.7	18.3	49.8	68.1
SC3	Schimmert Valkenburgerweg	Valkenburgerweg (365)	Gemengd	SC5	0.35	0.7	2.5	0	2.5
SC4	Schimmert Haagstraat	Haagstraat (2620)	Gemengd	SC5	0.58	0.7	4	0	4
SC5	Schimmert Oensel	De Kling (334)	Gemengd	SC0	1.51	0.7	10.6	7.1	17.7



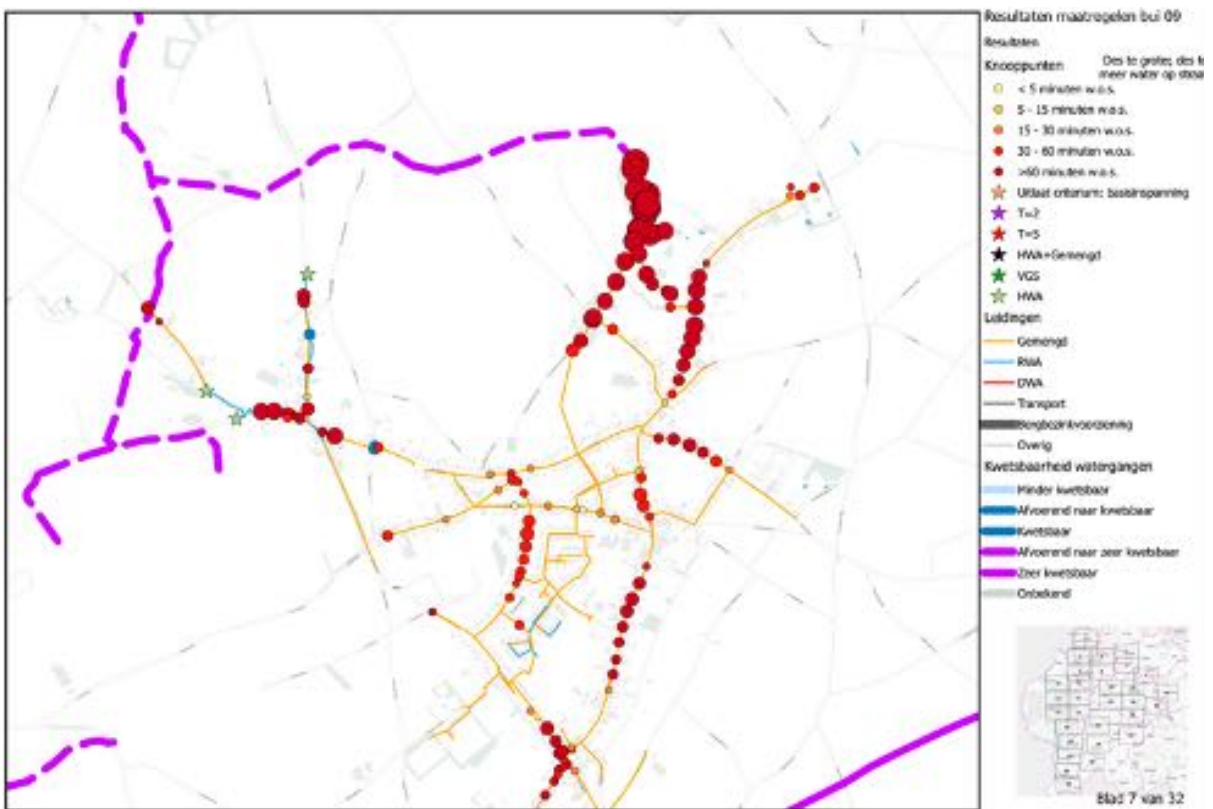
Overzicht rioleringsgebieden Groot- en Klein Haasdalen en Schimmert



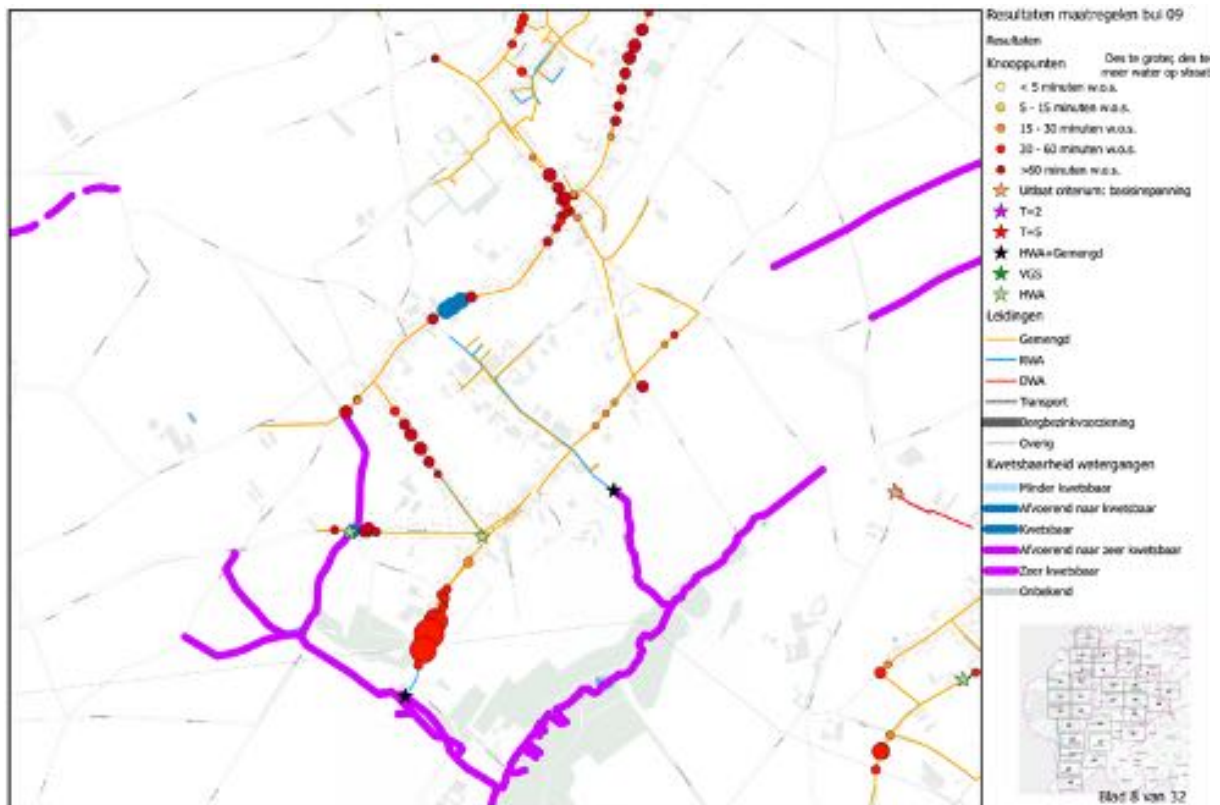
Overzicht rioleringsgebieden Groot- en Klein Haasdalen en Schimmert



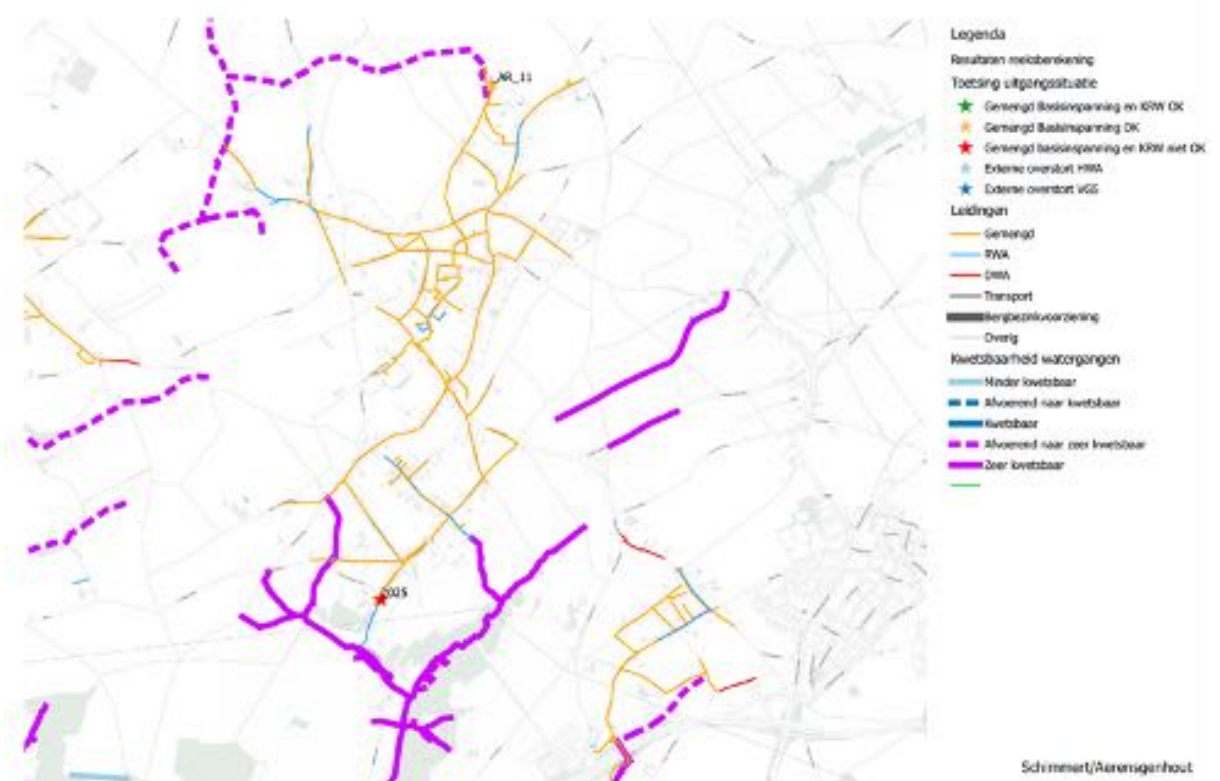
Afvoer naar Keutelbeek bij bui 8



Afvoer naar Keutelbeek bij bui 9



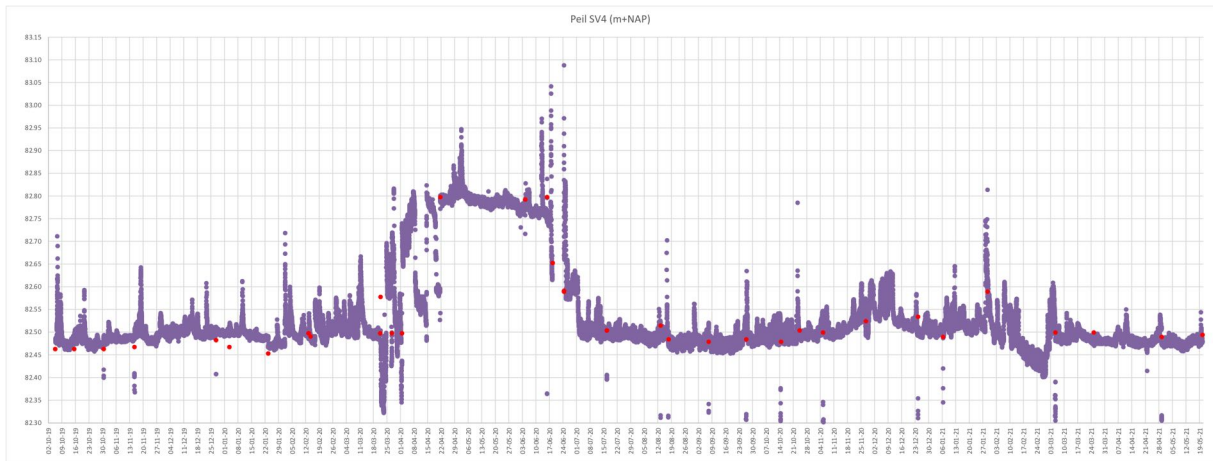
Afvoer naar Strabeker Vloedgraaf bij bui 9



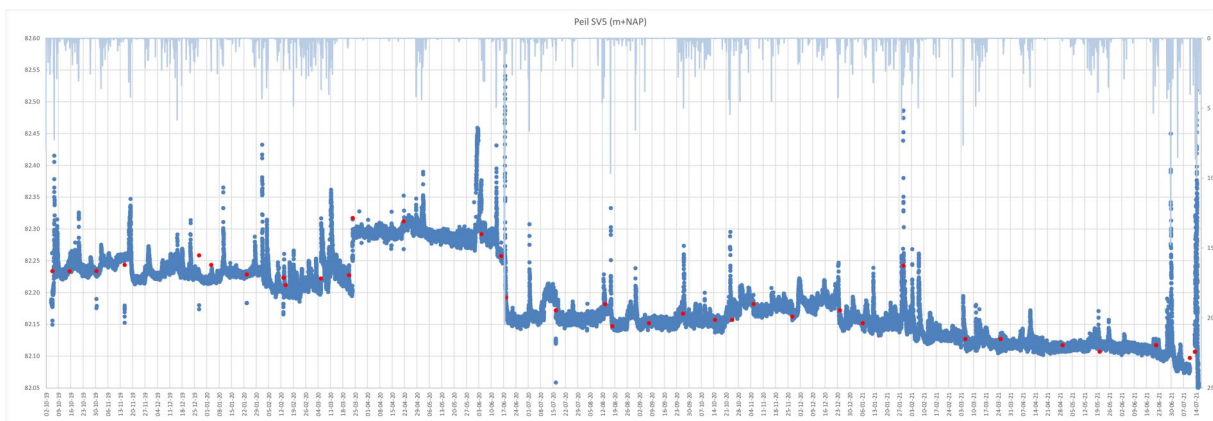
Samenvatting beoordeling basisinspanning en KRW, overstort De Steeg ontbreekt!

Bijlage 6: Resultaten peilmetingen

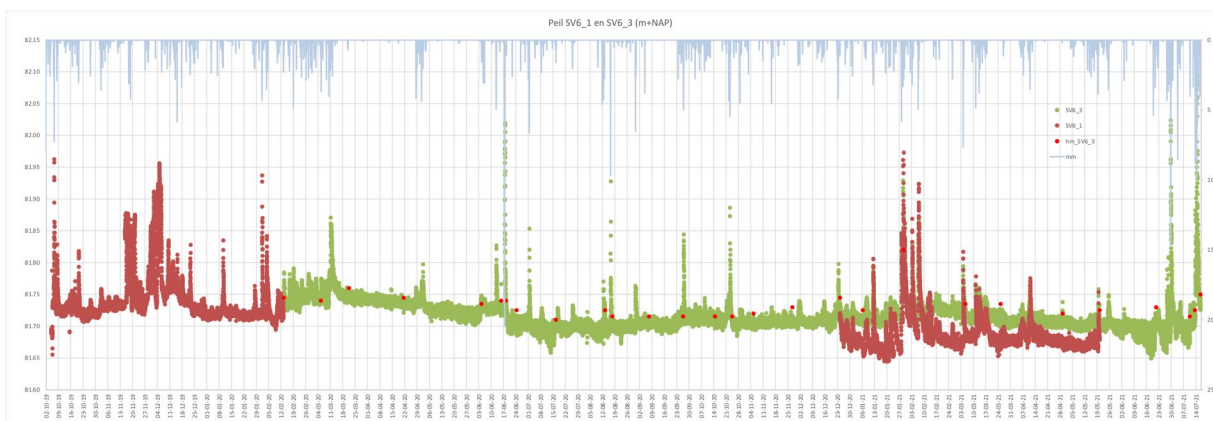
In deze bijlage worden de meest relevante resultaten gegeven van de peilmetingen.



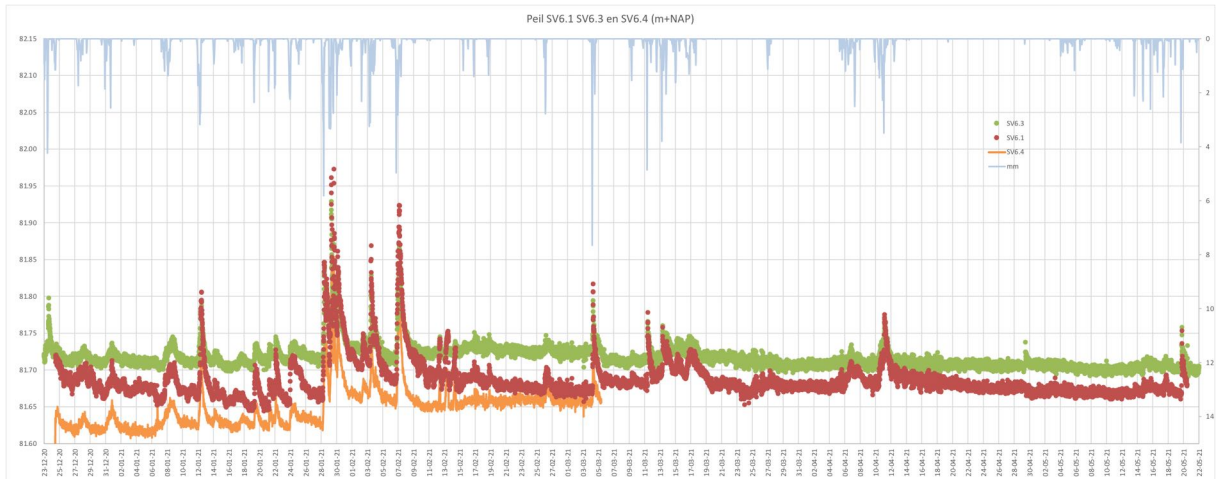
Gemeten waterpeilen bij meetpunt SV4 , meetstuw



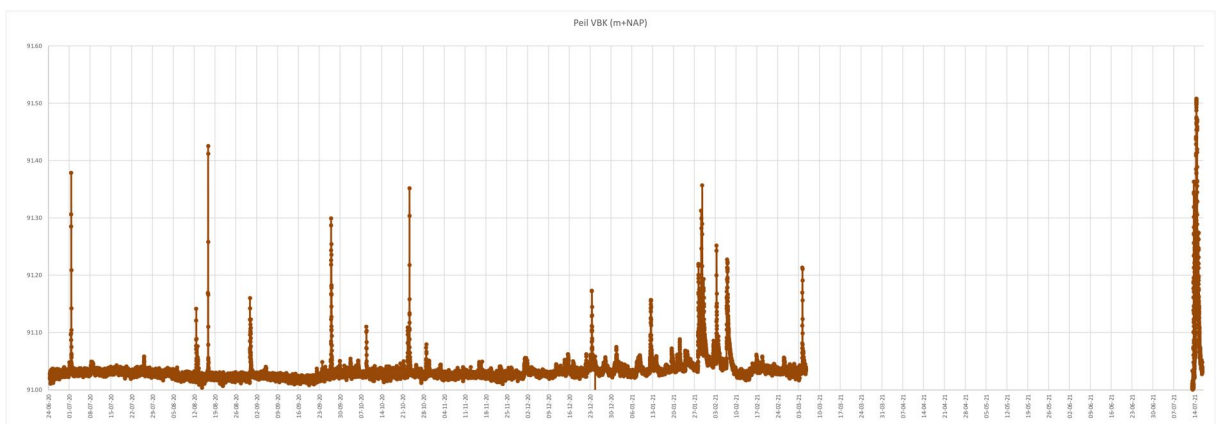
Gemeten waterpeilen bij meetpunt SV5 (bovenstrooms suppletie)



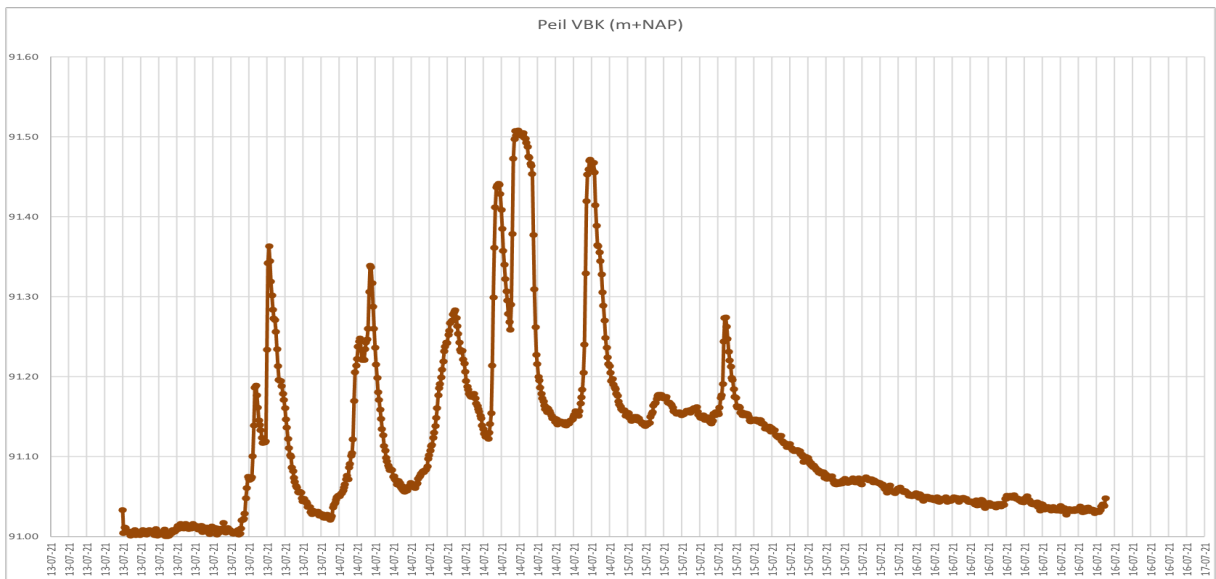
Gemeten waterpeilen bij meetpunt SV6.1 en SV6.3 (benedenstrooms suppletie)



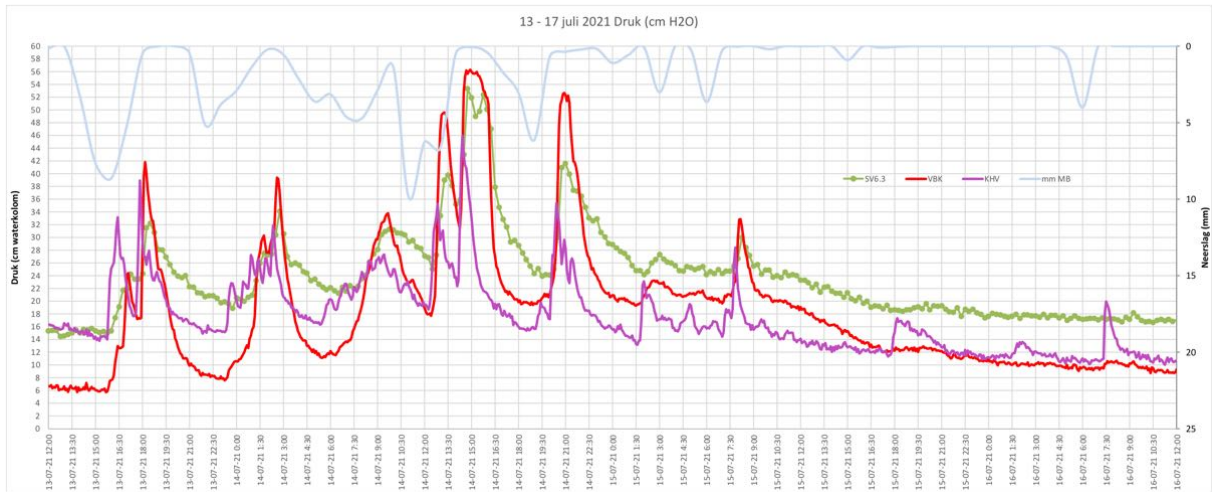
Gemeten waterpeilen bij meetpunt SV6.1, SV6.3 en SV6.4 (variatie bodemligging, SV6.3 constant)



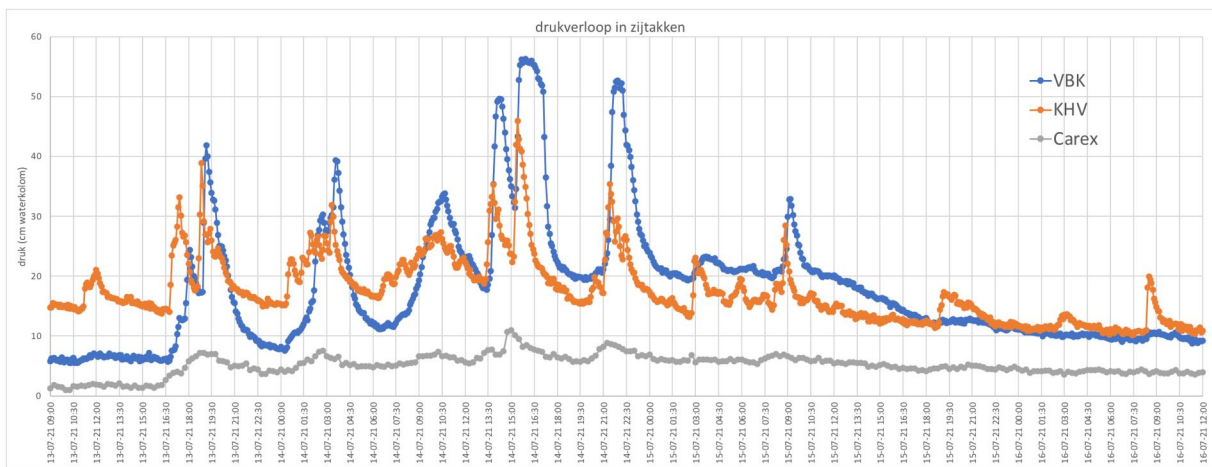
Gemeten waterpeilen bij meetpunt VBK in de Voorste Brummenkuil, gehele meetreeks



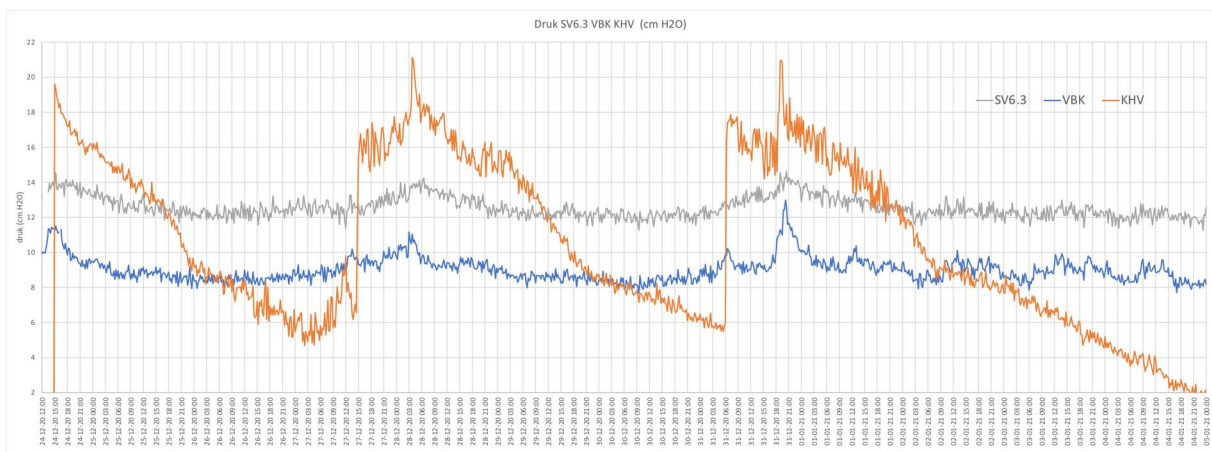
Gemeten waterpeilen bij meetpunt VBK in de Voorste Brummenkuil, 13-17 juli 2021



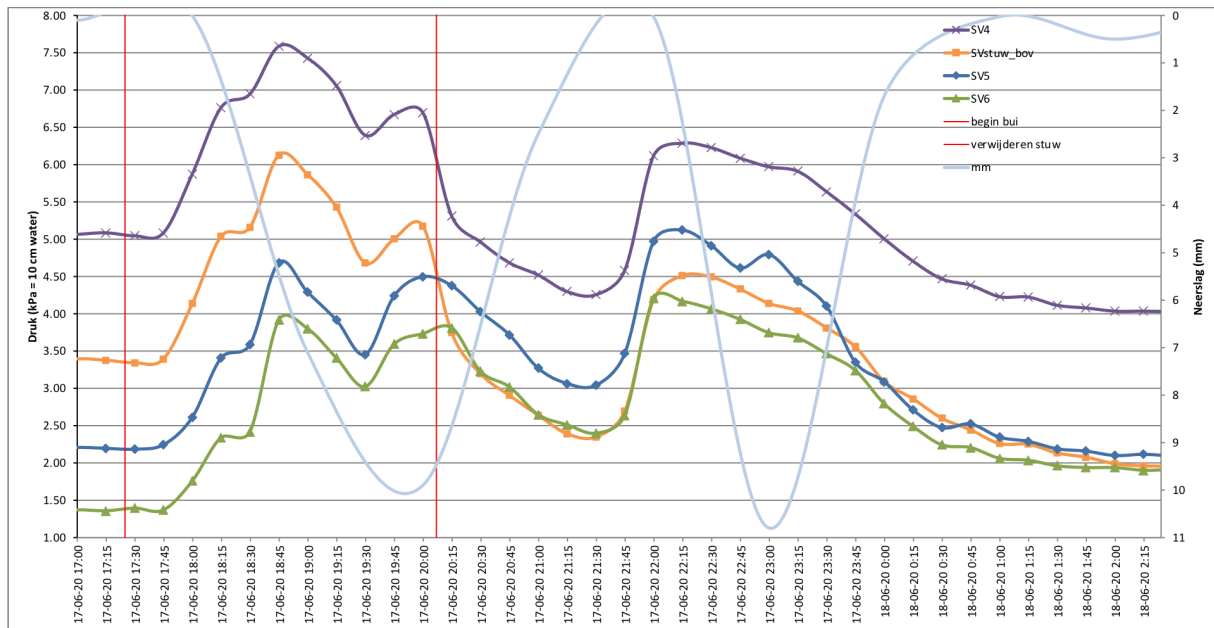
Gemeten druk bij meetpunten SV6 en overstorten VBK en KHV, 13-17 juli 2021



Drukmetingen Strabeker Vloedgraaf, verschil overstorten VBK, KHV en Carexweide.

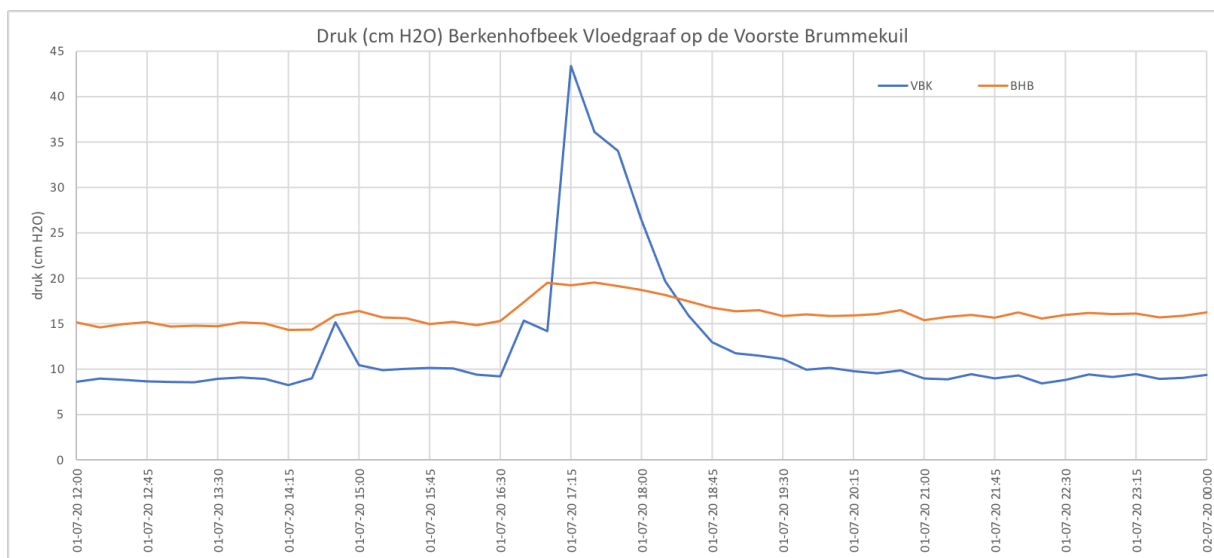


Drukmetingen Strabeker Vloedgraaf SV9, bij bodemval en spoelgat



Drukmetingen Strabeker Vloedgraaf piekafvoer op 17 juni 2020, meetstuw

Uit de peilmetingen en de waarnemingen gedurende de piekafvoer van 17 juni 2020 konden de debieten voldoende nauwkeurig worden berekend.



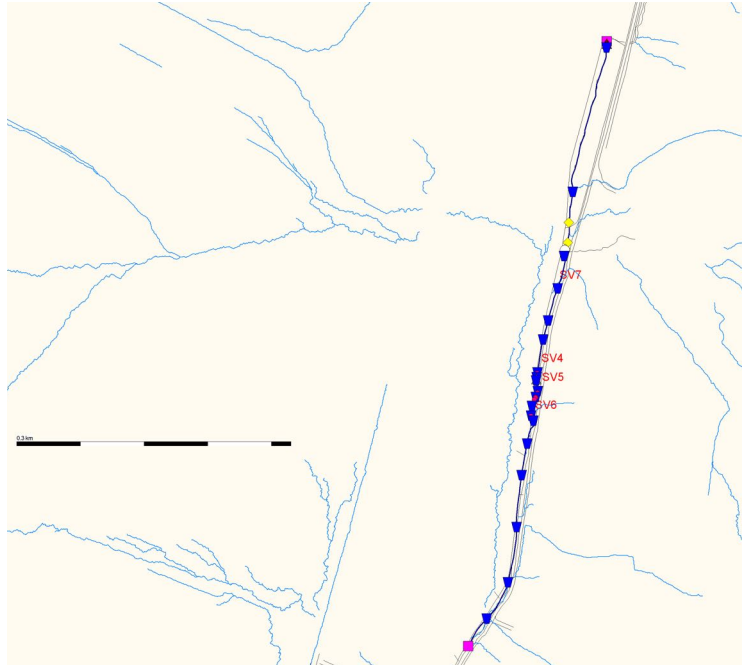
Vergelijking peilstijging Vloedgraaf op de Voorste Brummenkuil en zijkak Carexweide

Uit de vergelijking van de drukmetingen in de Vloedgraaf op de Voorste Brummenkuil en de Carexweide blijkt duidelijk hoe groot het verschil in afvoer is. Het betreft twee situaties met vergelijkbare profielen en eenzelfde diameter van de duikers. De drukstijging bij de Carexweide is minimaal en het debiet is ook veel kleiner.

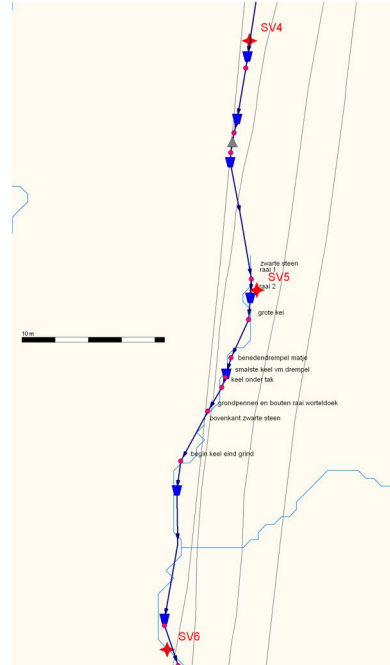
Bijlage 7: Resultaten SOBEK-berekeningen

In deze bijlage zijn zeer beknopt de meest relevante resultaten beschreven van de modelberekeningen in de Strabeker Vloedgraaf.

Berekeningen tbv kalibratie en tbv correctie debietmeting ivm achterloopseheid meetstuw

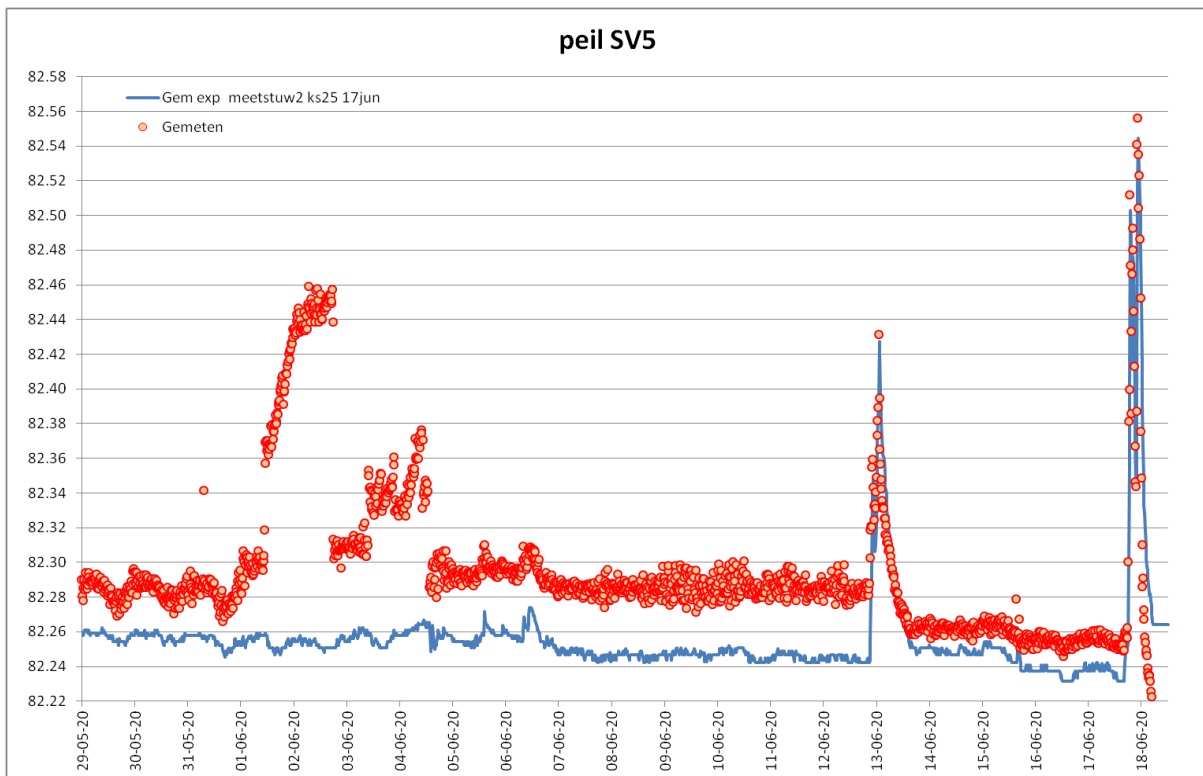


Modellschematisatie gehele traject

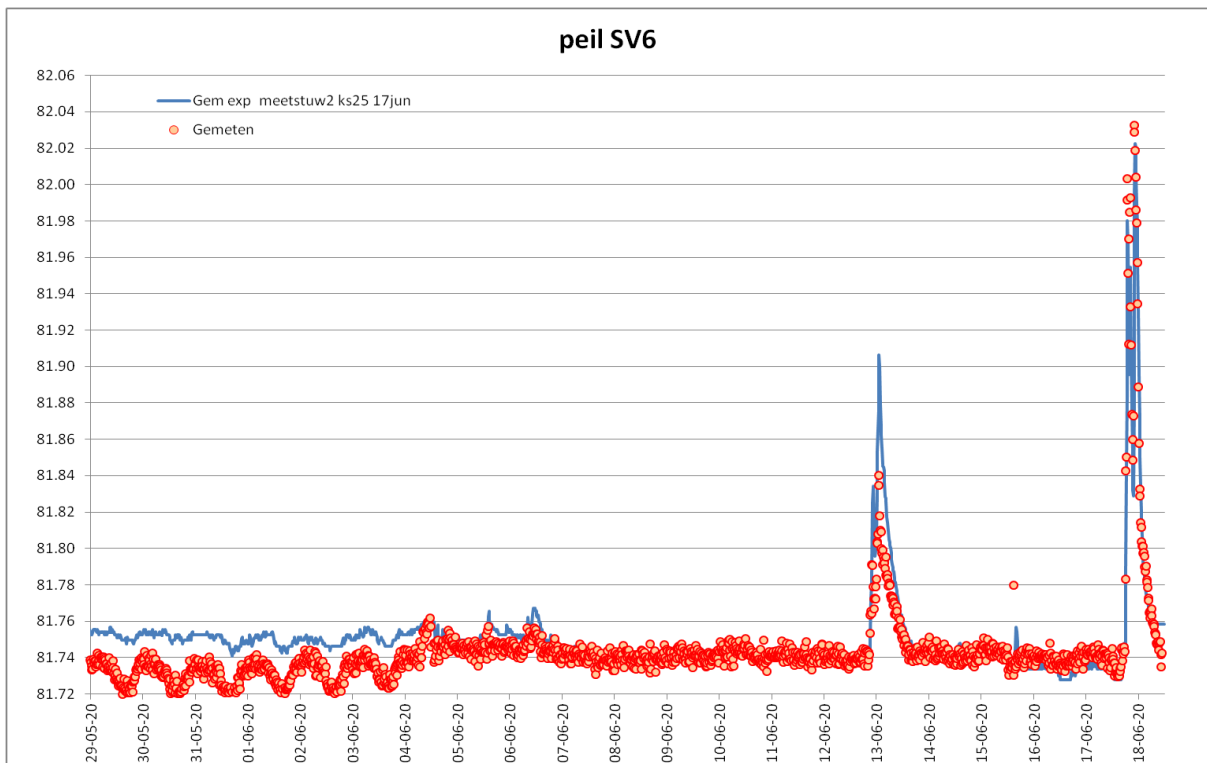


Idem, in detail maatregelen

Resultaten SOBEK-modelonderzoek tbv inter- en extrapolatie debieten

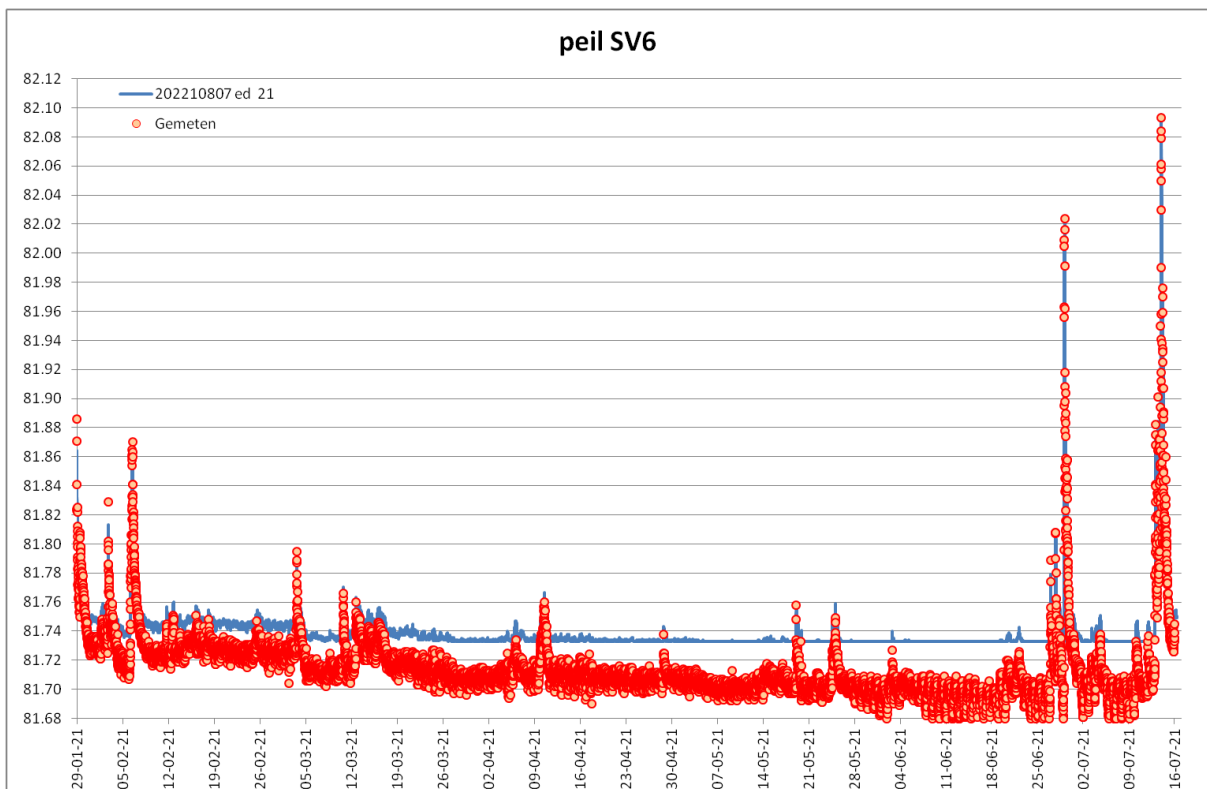


Vergelijking berekend en gemeten peil in SV5 tot 18 juni 2020



Vergelijking berekend en gemeten peil in SV6 tot 18 juni 2020

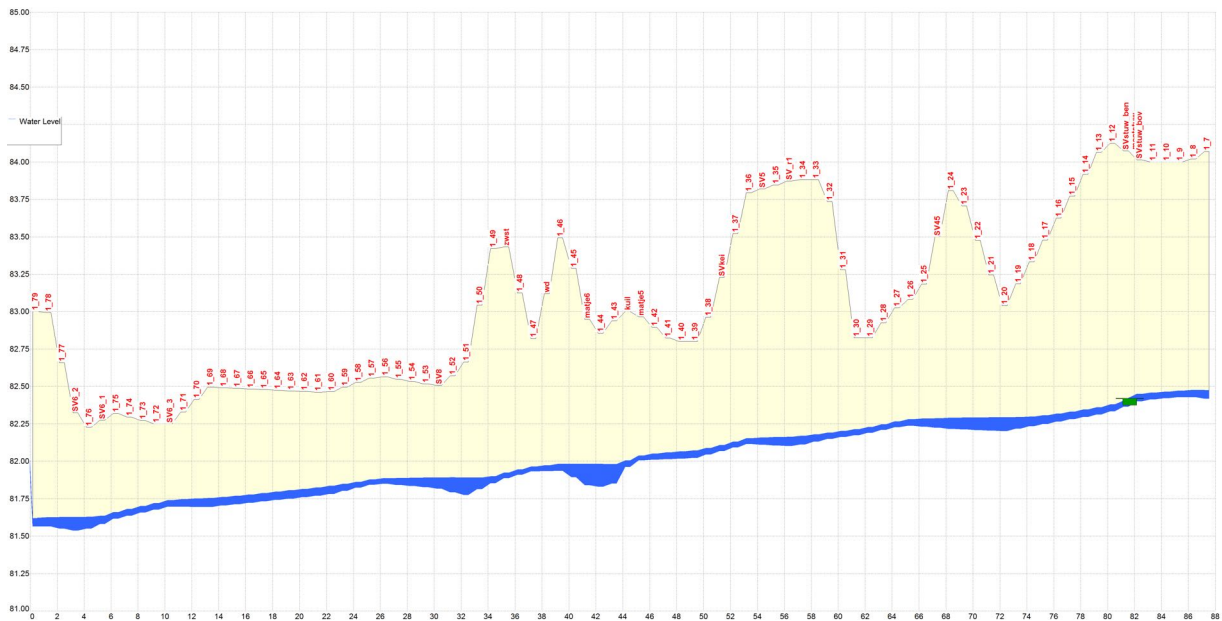
Berekeningen tbv inter- en extrapolatie debieten



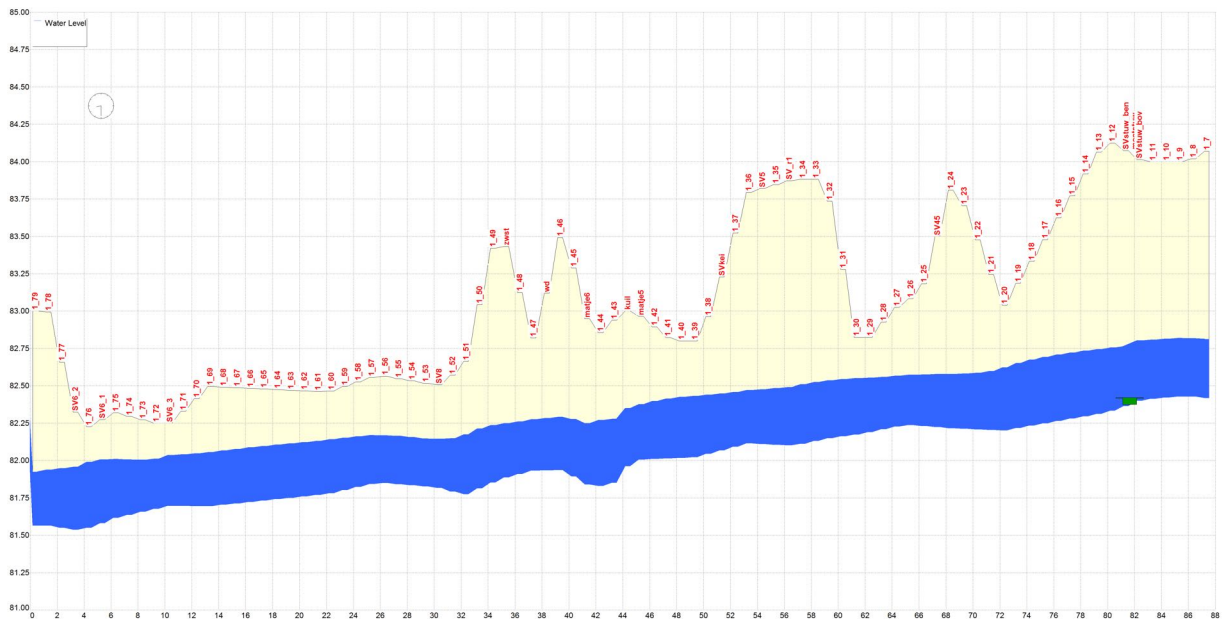
Vergelijking berekend en gemeten peil in SV6 in 2021

Doordat wordt gerekend met een vaste bodemligging en de erosie nog niet is meegenomen worden de gemeten peilen bij lage afvoeren niet goed benaderd. Met correctie van de bodemhoogten is dit op te lossen, maar bovenstaande figuur toont in principe ook direct die erosie.

Er zijn ook berekeningen uitgevoerd ter benadering van de gemiddelde stroomsnelheden, Froude-getallen en schuifspanningen. Dit is slechts zeer indicatief omdat de onzekerheden erg groot worden, zeker als de waterdiepte zo gering is. Mogelijk kunnen betere resultaten worden verkregen met 2D-of 3D-modellen. Maar dit is niet zeker, want de locatiespecifieke variaties kunnen daarin toch maar gedeeltelijk worden meegenomen.



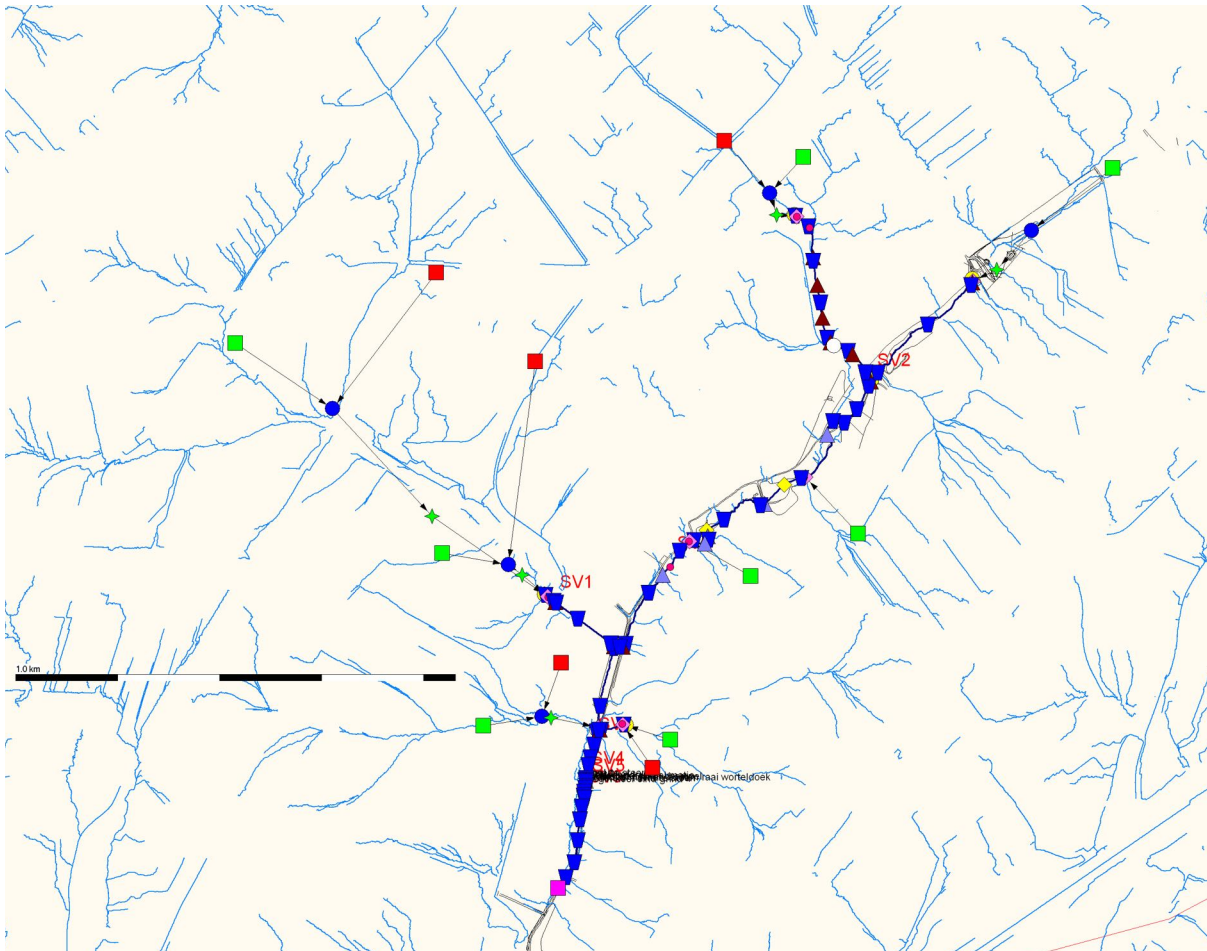
Lengteprofiel bij lage basisafvoer januari 2021



Lengteprofiel met maximale peilen bij piekafvoer 29 juni 2021 20:30

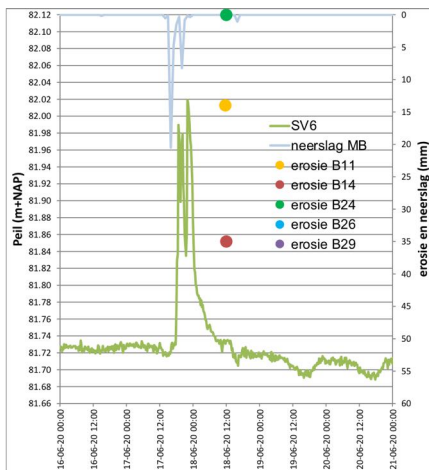
Duidelijk is dat in het onderzoekstraject van de Strabeker Vloedgraaf benedenstrooms de monding van de Berkenhofbeek de beek niet buiten haar bedding komt. Verder benedenstrooms en verder bovenstrooms en in de Vloedgraaf op de Voorste Brummenkuil kan dit bij extreme piekafvoeren wel gebeuren.

Berekeningen tbv bepaling bijdragen deelstroomgebieden

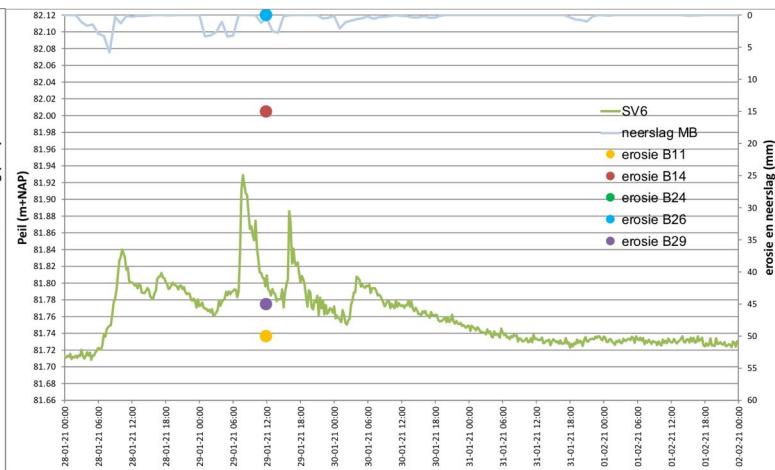


Modelschematisatie tbv berekening afvoeren deelstroomgebieden

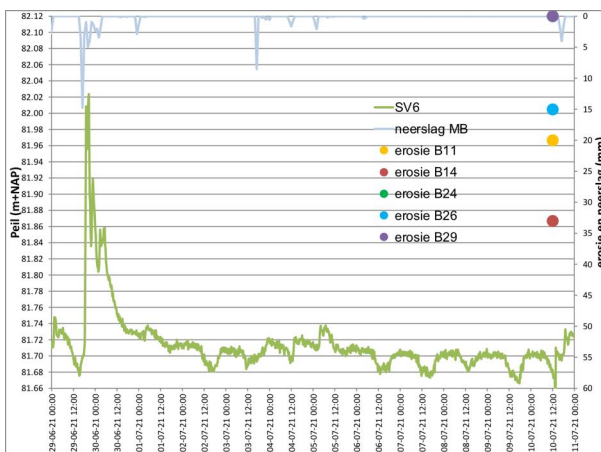
De modelberekeningen om te bepalen welke bijdrage de deelstroomgebieden en afwaterings-eenheden hebben is gestaakt omdat te veel gegevens van de riolering en de afvoerende verharde oppervlakken ontbraken. Bovendien is de modellering met de RR-module hier zeer beperkend.



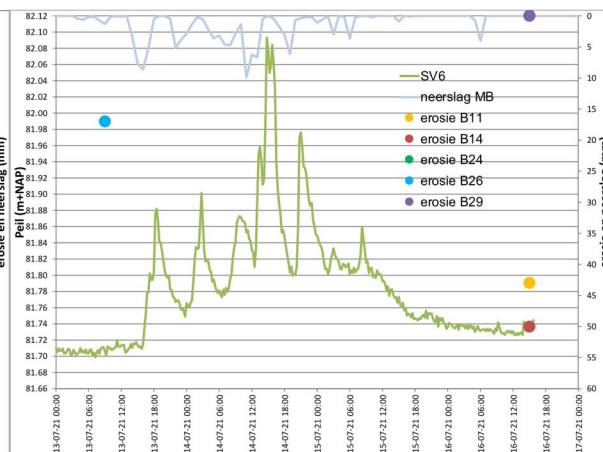
Erosie 17 juni 2020



Erosie 29 januari 2021



Erosie 29 juni 2021

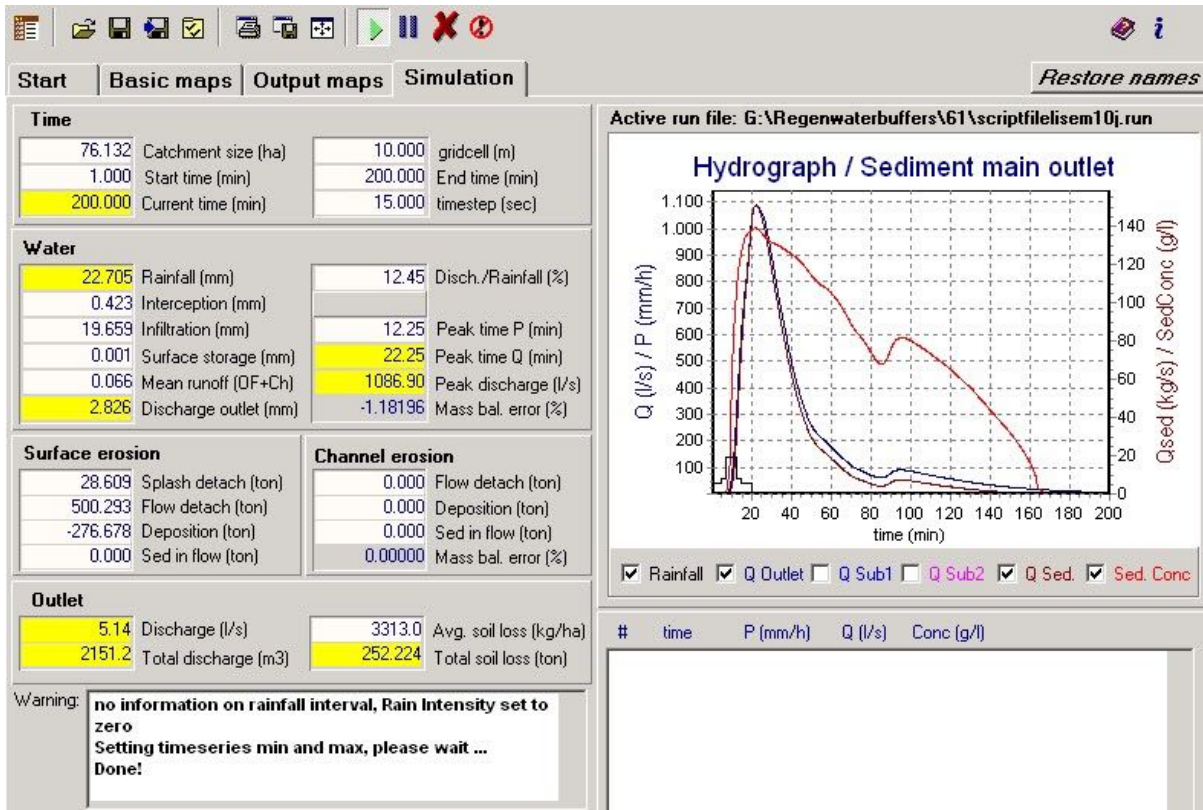


Erosie 14 juli 2021

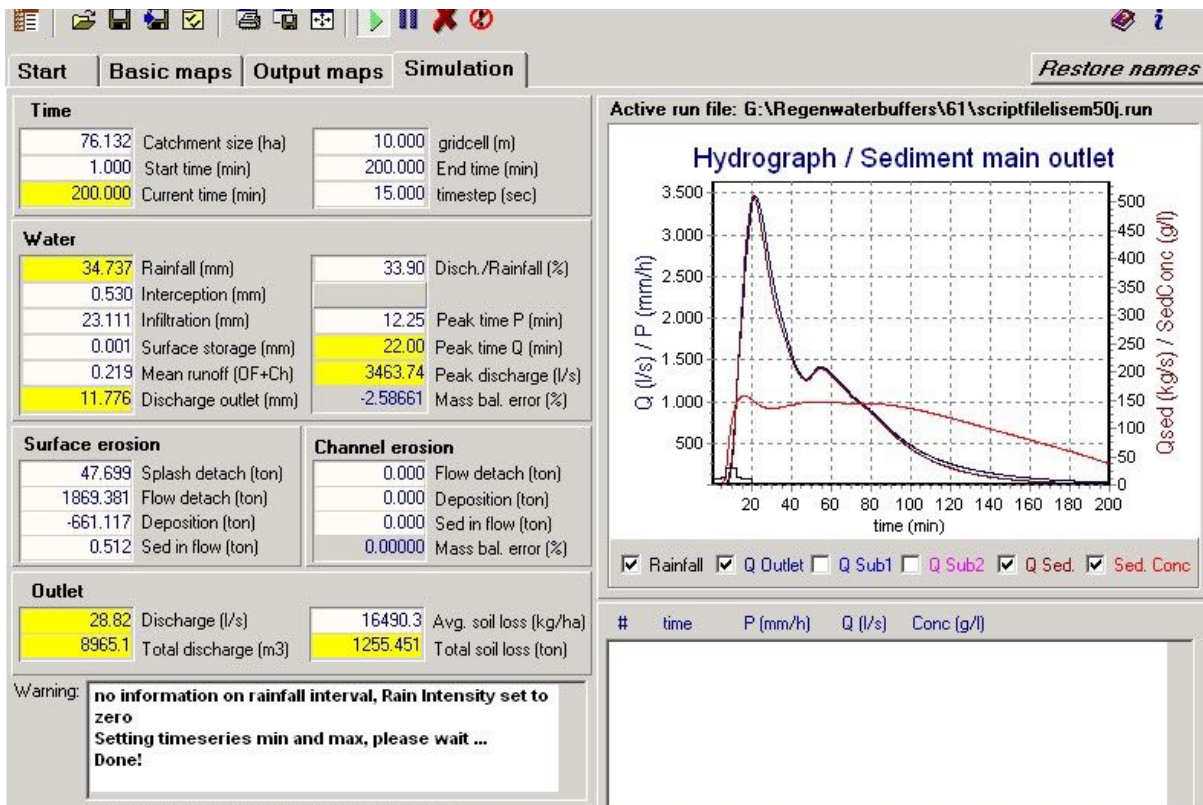
Gebeurtenis	Tijdsduur (uren)
17 juni 2020	24
29 januari 2021	85 (35)
29 juni 2021	48
14 juli 2021	72

Bijlage 9: Resultaten LISEM-berekeningen

Buffer Billich

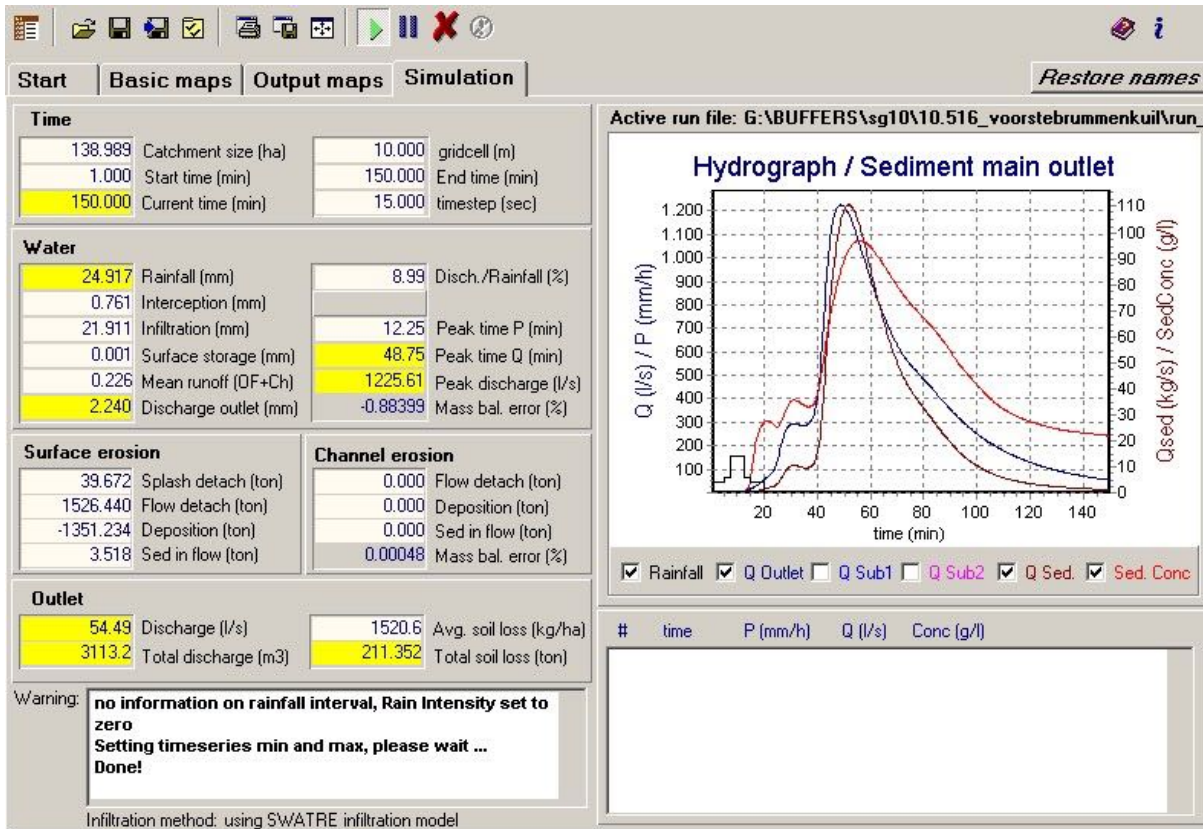


Uitkomsten LISEM-berekening T10 (23 mm/20 min)

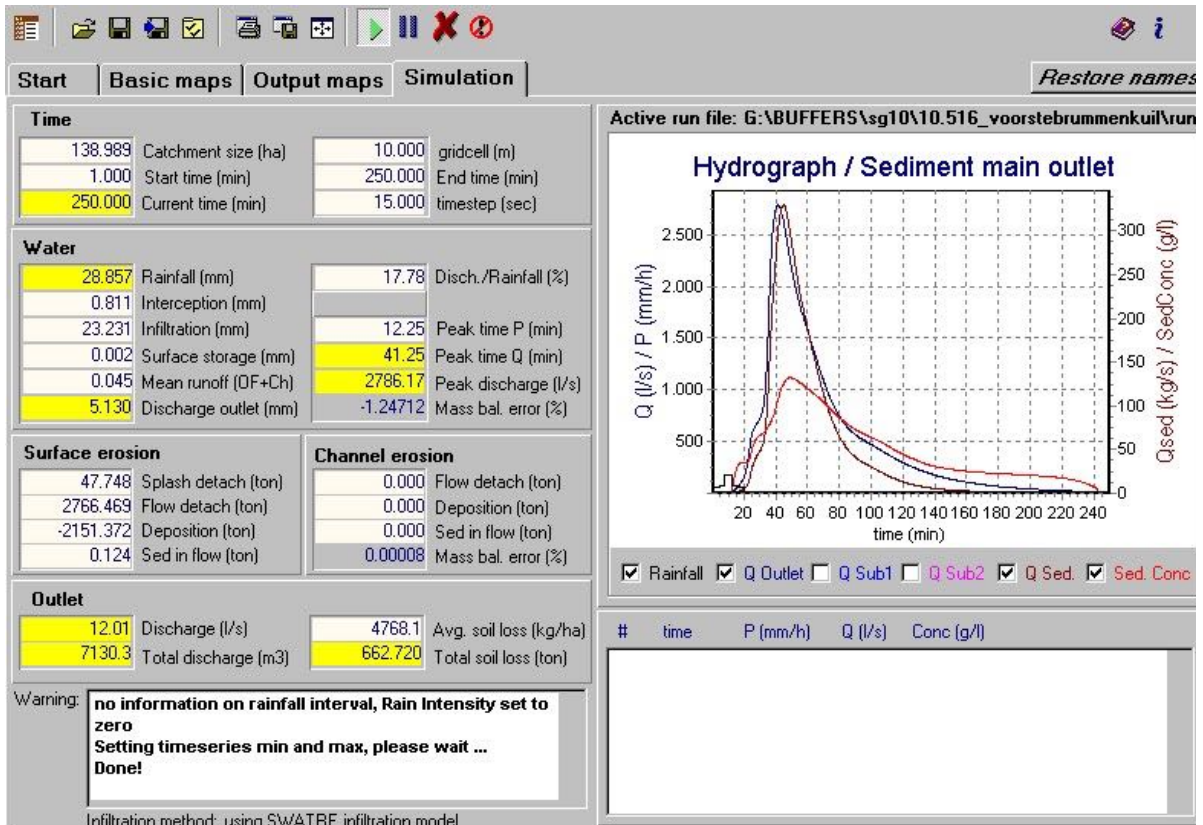


Uitkomsten LISEM-berekening T50 (35 mm/20 min)

Buffer Voorste Brummenkuil



Uitkomsten LISEM-berekening T10 (25 mm/20 min)



Uitkomsten LISEM-berekening T25 (29 mm/20 min)

Deze geven grote overschattingen vergeleken met de verkregen metingen!

ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn

Het Kennisnetwerk Ontwikkeling Beheer Natuurkwaliteit:

- is een onafhankelijk en innovatief platform waarin beheer, beleid en wetenschap op het gebied van natuurherstel en -beheer samenwerken;
- ontwikkelt en verspreidt kennis met als doel het structureel herstel en beheer van natuurkwaliteit.



Kennisnetwerk OBN wordt gecoördineerd door de VBNE en gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en BIJ12

Vereniging van bos- en natuurterreineigenaren (VBNE)

Princenhof Park 7
3972 NG Driebergen
0343-745250
info@vbne.nl

Alle publicaties en
producten van het
OBN Kennisnetwerk
zijn te vinden op
www.natuurkennis.nl

ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit

